

|                 |  |      |
|-----------------|--|------|
| Vorwort         |  | XXXV |
| Kapitel 1       | Einführung: Schlüsselthemen der Biologie .....               | 1    |
| <b>TEIL I</b>   | <b>Die chemischen Grundlagen des Lebens</b>                  | 37   |
| Kapitel 2       | Chemische Grundlagen der Biologie .....                      | 40   |
| Kapitel 3       | Wasser als Grundstoff für Leben .....                        | 63   |
| Kapitel 4       | Kohlenstoff und die molekulare Vielfalt des Lebens .....     | 80   |
| Kapitel 5       | Struktur und Funktion biologischer Makromoleküle .....       | 94   |
| <b>TEIL II</b>  | <b>Die Zelle</b>   | 127  |
| Kapitel 6       | Die Struktur von Zellen .....                                | 130  |
| Kapitel 7       | Struktur und Funktion biologischer Membranen .....           | 170  |
| Kapitel 8       | Konzepte des Stoffwechsels .....                             | 193  |
| Kapitel 9       | Zellatmung: Die Gewinnung chemischer Energie .....           | 220  |
| Kapitel 10      | Photosynthese .....  | 251  |
| Kapitel 11      | Zelluläre Kommunikation .....                                | 279  |
| Kapitel 12      | Der Zellzyklus .....   | 303  |
| <b>TEIL III</b> | <b>Genetik</b>   | 327  |
| Kapitel 13      | Meiose und geschlechtliche Fortpflanzung .....               | 330  |
| Kapitel 14      | Mendel und das Genkonzept .....                              | 350  |
| Kapitel 15      | Chromosomen bilden die Grundlage der Vererbung .....         | 384  |
| Kapitel 16      | Die molekularen Grundlagen der Vererbung .....               | 409  |
| Kapitel 17      | Vom Gen zum Protein .....                                    | 435  |
| Kapitel 18      | Regulation der Genexpression .....                           | 468  |
| Kapitel 19      | Viren .....  | 506  |
| Kapitel 20      | Biotechnologie .....   | 527  |
| Kapitel 21      | Genome und ihre Evolution .....                              | 568  |
| <b>TEIL IV</b>  | <b>Evolutionsmechanismen</b>                                 | 599  |
| Kapitel 22      | Evolutionstheorie: Die darwinistische Sicht des Lebens ..... | 602  |
| Kapitel 23      | Die Evolution von Populationen .....                         | 627  |
| Kapitel 24      | Die Entstehung der Arten .....                               | 654  |
| Kapitel 25      | Vergangene Welten .....                                      | 680  |
| <b>TEIL V</b>   | <b>Die Evolutionsgeschichte der biologischen Vielfalt</b>    | 715  |
| Kapitel 26      | Der phylogenetische Stammbaum der Lebewesen .....            | 718  |
| Kapitel 27      | Bacteria und Archaea .....                                   | 746  |
| Kapitel 28      | Protisten .....  | 780  |

|                  |  |             |
|------------------|--|-------------|
| Kapitel 29       | Die Vielfalt der Pflanzen I: Wie Pflanzen das Land eroberten . . . . . | 811         |
| Kapitel 30       | Die Vielfalt der Pflanzen II: Evolution der Samenpflanzen . . . . .    | 835         |
| Kapitel 31       | Pilze . . . . .  | 858         |
| Kapitel 32       | Eine Einführung in die Diversität und Evolution der Metazoa . . . . .  | 882         |
| Kapitel 33       | Wirbellose Tiere . . . . .   | 900         |
| Kapitel 34       | Wirbeltiere . . . . .  | 942         |
| <b>TEIL VI</b>   | <b>Pflanzen – Form und Funktion</b>                                    | <b>995</b>  |
| Kapitel 35       | Blütenpflanzen: Struktur, Wachstum, Entwicklung . . . . .              | 998         |
| Kapitel 36       | Stoffaufnahme und Stofftransport bei Gefäßpflanzen . . . . .           | 1032        |
| Kapitel 37       | Boden und Pflanzenernährung . . . . .                                  | 1060        |
| Kapitel 38       | Fortpflanzung und Biotechnologie bei Angiospermen . . . . .            | 1082        |
| Kapitel 39       | Pflanzenreaktionen auf innere und äußere Signale . . . . .             | 1109        |
| <b>TEIL VII</b>  | <b>Tiere – Form und Funktion</b>                                       | <b>1149</b> |
| Kapitel 40       | Grundprinzipien tierischer Form und Funktion . . . . .                 | 1152        |
| Kapitel 41       | Hormone und das endokrine System . . . . .                             | 1182        |
| Kapitel 42       | Die Ernährung der Tiere . . . . .                                      | 1211        |
| Kapitel 43       | Kreislauf und Gasaustausch . . . . .                                   | 1242        |
| Kapitel 44       | Das Immunsystem . . . . .  | 1282        |
| Kapitel 45       | Osmoregulation und Exkretion . . . . .                                 | 1314        |
| Kapitel 46       | Fortpflanzung der Tiere . . . . .                                      | 1343        |
| Kapitel 47       | Entwicklung der Tiere . . . . .  | 1376        |
| Kapitel 48       | Neurone, Synapsen und Signalgebung . . . . .                           | 1410        |
| Kapitel 49       | Nervensysteme . . . . .  | 1432        |
| Kapitel 50       | Sensorische und motorische Mechanismen . . . . .                       | 1461        |
| Kapitel 51       | Tierisches Verhalten . . . . .   | 1502        |
| <b>TEIL VIII</b> | <b>Ökologie</b>  | <b>1535</b> |
| Kapitel 52       | Ökologie und die Biosphäre: Eine Einführung . . . . .                  | 1538        |
| Kapitel 53       | Populationsökologie . . . . .  | 1575        |
| Kapitel 54       | Ökologie der Lebensgemeinschaften . . . . .                            | 1609        |
| Kapitel 55       | Ökosysteme . . . . .   | 1645        |
| Kapitel 56       | Naturschutz und Renaturierungsökologie . . . . .                       | 1678        |
| Anhang           |  | 1711        |

**Kapitel 1 Einführung: Schlüsselthemen der Biologie**

1

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 1.1   | Theorien und Konzepte verbinden die Disziplinen der Biologie . . . . .   | 3  |
| 1.1.1 | Evolution, der große, die gesamte Biologie überspannende Bogen . . . . .   | 3  |
| 1.1.2 | Jede Organisationsebene in der biologischen Hierarchie ist durch emergente Eigenschaften charakterisiert . . . . . | 4  |
| 1.1.3 | Organismen interagieren mit ihrer Umwelt und tauschen dabei Materie und Energie aus . . . . .                      | 8  |
| 1.1.4 | Die Biologie hat es mit Strukturen und Funktionen zu tun . . . . .   | 9  |
| 1.1.5 | Zellen sind die grundlegenden Struktur- und Funktionseinheiten eines Lebewesens . . . . .                          | 10 |
| 1.1.6 | Die Kontinuität des Lebens beruht auf vererbbarer Information in Form von DNA . . . . .                            | 11 |
| 1.1.7 | Biologische Systeme werden über Rückkopplungsmechanismen reguliert . . . . .                                       | 14 |
| 1.2   | Einheitlichkeit und Vielfalt der Organismen sind das Ergebnis der Evolution . . . . .                              | 16 |
| 1.2.1 | Ordnung in die Vielfalt der Lebewesen bringen . . . . .  | 16 |
| 1.2.2 | Charles Darwin und die Theorie der natürlichen Selektion . . . . .   | 19 |
| 1.2.3 | Der Stammbaum des Lebens . . . . .   | 22 |
| 1.3   | Naturwissenschaftler verwenden unterschiedliche Methoden . . . . .   | 24 |
| 1.3.1 | Biologie als empirische Wissenschaft . . . . .   | 25 |
| 1.3.2 | Theoretische Wissenschaft . . . . .  | 26 |
| 1.3.3 | Eine Fallstudie: Die Erforschung der Mimikry an Schlangenpopulationen . . . . .                                    | 29 |
| 1.3.4 | Grenzen der Wissenschaft . . . . .   | 31 |
| 1.3.5 | Die Rolle von Modellen in der Naturwissenschaft . . . . .  | 32 |
| 1.3.6 | Naturwissenschaft, Technik und Gesellschaft . . . . .  | 32 |

**TEIL I Die chemischen Grundlagen des Lebens**

37

**Kapitel 2 Chemische Grundlagen der Biologie**

40

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 2.1   | Materie besteht aus chemischen Elementen, die in reiner Form und in Form chemischer Verbindungen vorkommen . . . . . | 42 |
| 2.1.1 | Chemische Elemente und chemische Verbindungen . . . . .  | 42 |
| 2.1.2 | Chemische Elemente, die essenziell für das Leben sind . . . . .  | 43 |
| 2.2   | Die Eigenschaften eines chemischen Elementes hängen vom Aufbau seiner Atome ab . . . . .                             | 44 |
| 2.2.1 | Subatomare Teilchen . . . . .  | 44 |
| 2.2.2 | Ordnungszahl und Massenzahl . . . . .  | 45 |
| 2.2.3 | Isotope . . . . .  | 46 |
| 2.2.4 | Die Energieniveaus von Elektronen . . . . .  | 48 |
| 2.2.5 | Elektronenverteilung und chemische Eigenschaften . . . . .   | 49 |
| 2.2.6 | Atomorbitale . . . . .   | 50 |
| 2.3   | Bildung und Eigenschaften von Molekülen hängen von den chemischen Bindungen zwischen den Atomen ab . . . . .         | 51 |
| 2.3.1 | Die Kovalenzbindung . . . . .  | 52 |

|   |  |     |
|---|--|-----|
| 2.3.2   | Die Ionenbindung .....   | 54  |
| 2.3.3   | Schwache, nicht kovalente Bindungstypen .....  | 55  |
| 2.3.4   | Molekülform und Molekülfunktion .....  | 57  |
| 2.4   | Chemische Reaktionen führen zur Bildung und Auflösung von chemischen Bindungen .....                     | 58  |
| <b>Kapitel 3 Wasser als Grundstoff für Leben</b>                    |  | 63  |
| 3.1   | Die Polarität des Wassermoleküls führt zu Wasserstoffbrückenbindungen .....                              | 64  |
| 3.2   | Vier Eigenschaften des Wassers tragen dazu bei, dass die Erde für das Leben ein geeigneter Ort ist ..... | 65  |
| 3.2.1   | Kohäsion .....   | 65  |
| 3.2.2   | Ausgleich von Temperaturunterschieden .....  | 66  |
| 3.2.3   | Aufschwimmendes Eis als Garant für den Lebensraum Wasser .....   | 68  |
| 3.2.4   | Des Lebens Lösungsmittel .....   | 69  |
| 3.3   | Die Säure-/Base-Bedingungen beeinflussen lebende Organismen .....  | 72  |
| 3.3.1   | Effekte einer pH-Wertveränderung .....   | 72  |
| 3.3.2   | Gefährdungen der Wasserqualität auf der Erde .....   | 75  |
| <b>Kapitel 4 Kohlenstoff und die molekulare Vielfalt des Lebens</b> |  | 80  |
| 4.1   | Die organische Chemie befasst sich mit dem Studium von Verbindungen des Kohlenstoffs .....               | 81  |
| 4.2   | Kohlenstoffgerüste erlauben die Bildung vielgestaltiger Moleküle .....                                   | 83  |
| 4.2.1   | Die Bindungsbildung des Kohlenstoffs .....   | 83  |
| 4.2.2   | Molekulare Vielfalt durch Variation des Kohlenstoffgerüstes .....  | 85  |
| 4.3   | Eine kleine Anzahl funktioneller Gruppen bildet den Schlüssel zur Funktion von Biomolekülen .....        | 88  |
| 4.3.1   | Die für die Lebensprozesse wichtigsten funktionellen Gruppen .....                                       | 88  |
| 4.3.2   | ATP: Eine wichtige Energiequelle zellulärer Prozesse .....   | 89  |
| 4.3.3   | Die chemischen Elemente des Lebens: Eine Rückschau .....   | 89  |
| <b>Kapitel 5 Struktur und Funktion biologischer Makromoleküle</b>   |  | 94  |
| 5.1   | Makromoleküle sind aus Monomeren aufgebaute Polymere .....   | 95  |
| 5.1.1   | Synthese und Abbau von Polymeren .....   | 95  |
| 5.1.2   | Die Vielfalt der Polymere .....  | 96  |
| 5.2   | Kohlenhydrate dienen als Energiequelle und Baumaterial .....   | 97  |
| 5.2.1   | Zucker .....   | 97  |
| 5.2.2   | Polysaccharide .....   | 99  |
| 5.3   | Lipide: Eine heterogene Gruppe hydrophober Moleküle .....  | 103 |
| 5.3.1   | Fette .....  | 103 |
| 5.3.2   | Phospholipide .....  | 105 |
| 5.3.3   | Steroide .....   | 106 |
| 5.4   | Proteine: Funktionsvielfalt durch Strukturvielfalt .....   | 107 |
| 5.4.1   | Polypeptide .....  | 107 |
| 5.4.2   | Proteinstruktur und Proteinfunktion .....  | 109 |
| 5.5   | Nucleinsäuren speichern und übertragen die Erbinformation .....  | 118 |
| 5.5.1   | Die Aufgaben der Nucleinsäuren .....   | 118 |
| 5.5.2   | Nucleinsäurestruktur .....   | 119 |
| 5.5.3   | Die DNA-Doppelhelix .....  | 120 |
| 5.5.4   | DNA und Proteine als Zeitmaß der Evolution .....   | 121 |
| 5.5.5   | Emergenz in der Molekularbiologie: Eine Rückschau .....  | 122 |

**Kapitel 6 Die Struktur von Zellen**

130

|       |  |     |
|-------|--|-----|
| 6.1   | Untersuchung von Zellen mittels Mikroskopie und Biochemie .....  | 131 |
| 6.1.1 | Mikroskopie .....  | 132 |
| 6.1.2 | Zellfraktionierung .....   | 135 |
| 6.2   | Eukaryotische Zellen sind kompartimentiert .....   | 136 |
| 6.2.1 | Vergleich prokaryotischer mit eukaryotischen Zellen .....  | 137 |
| 6.2.2 | Die eukaryotische Zelle im Überblick .....   | 138 |
| 6.3   | Die genetischen Anweisungen einer eukaryotischen Zelle sind im Zellkern codiert und werden von den Ribosomen umgesetzt ..... | 139 |
| 6.3.1 | Der Zellkern: Die Informationszentrale der Zelle .....   | 139 |
| 6.3.2 | Ribosomen: Die Proteinfabriken der Zelle .....   | 143 |
| 6.4   | Das Endomembransystem der Zelle: Regulation und Teil des Stoffwechsels .....   | 144 |
| 6.4.1 | Das endoplasmatische Reticulum: Die biosynthetische Fabrik .....   | 144 |
| 6.4.2 | Der Golgi-Apparat: Fracht- und Umbauzentrum .....  | 146 |
| 6.4.3 | Lysosomen: Kompartimente der Verdauung .....   | 147 |
| 6.4.4 | Vakuolen: Vielseitige Mehrzweckorganellen .....  | 149 |
| 6.4.5 | Das Endomembransystem: Eine Rückschau .....  | 149 |
| 6.5   | Mitochondrien und Chloroplasten: Kraftwerke der Zelle .....  | 150 |
| 6.5.1 | Mitochondrien: Umwandlung chemischer Energie .....   | 151 |
| 6.5.2 | Chloroplasten: Umwandlung von Lichtenergie .....   | 152 |
| 6.5.3 | Peroxisomen: Weitere Oxidationen .....   | 153 |
| 6.6   | Das Cytoskelett: Organisation von Struktur und Aktivität .....   | 153 |
| 6.6.1 | Funktionen des Cytoskeletts: Stütze, Motilität und Regulation .....  | 154 |
| 6.6.2 | Cytoskelettkomponenten .....   | 155 |
| 6.7   | Zell-Zell-Kommunikation .....  | 161 |
| 6.7.1 | Pflanzenzellwände .....  | 161 |
| 6.7.2 | Die extrazelluläre Matrix tierischer Zellen .....  | 162 |
| 6.7.3 | Zell-Zell-Verbindungen (interzelluläre Verbindungen) .....   | 164 |
| 6.7.4 | Die Zelle: Kleinste Einheit des Lebens .....   | 165 |

**Kapitel 7 Struktur und Funktion biologischer Membranen**

170

|       |   |     |
|-------|---|-----|
| 7.1   | Zelluläre Membranen bilden ein flüssiges Mosaik aus Lipiden und Proteinen .....                                     | 171 |
| 7.1.1 | Membranmodelle in der wissenschaftlichen Forschung .....  | 172 |
| 7.1.2 | Die Fluidität von Membranen .....   | 174 |
| 7.1.3 | Membranproteine und ihre Funktionen .....   | 175 |
| 7.1.4 | Die Rolle von Kohlenhydraten bei der Zell-Zell-Erkennung .....  | 177 |
| 7.1.5 | Synthese und topologische Asymmetrie von Membranen .....  | 178 |
| 7.2   | Die Membranstruktur bedingt selektive Permeabilität .....   | 179 |
| 7.2.1 | Die Permeabilität der Lipiddoppelschicht .....  | 179 |
| 7.2.2 | Transportproteine .....   | 179 |
| 7.3   | Passiver Transport: Diffusion durch eine Membran ohne Energiezufuhr .....   | 180 |
| 7.3.1 | Osmotische Effekte und die Wasserbalance .....  | 181 |
| 7.3.2 | Erleichterte Diffusion: Protein-gestützter passiver Transport .....   | 183 |
| 7.4   | Aktiver Transport: Gelöste Stoffe werden gegen ihr Konzentrationsgefälle unter Energieverbrauch transportiert ..... | 185 |
| 7.4.1 | Der Energiebedarf des aktiven Transports .....  | 185 |
| 7.4.2 | Wie Ionenpumpen das Membranpotenzial aufrechterhalten .....   | 186 |
| 7.4.3 | Cotransport: Gekoppelter Transport durch ein Membranprotein .....   | 187 |

|   |  |     |
|---|--|-----|
| 7.5   | Massentransport durch die Plasmamembran per Exo- und Endocytose .....                        | 188 |
| 7.5.1   | Exocytose .....  | 188 |
| 7.5.2   | Endocytose .....   | 188 |
| <b>Kapitel 8 Konzepte des Stoffwechsels</b>                   |  | 193 |
| 8.1   | Metabolismus: Umwandlung von Stoffen und Energie nach den Gesetzen der Thermodynamik .....   | 194 |
| 8.1.1   | Die biochemischen Prozesse sind in Stoffwechselpfaden organisiert ..                         | 194 |
| 8.1.2   | Energieformen .....  | 195 |
| 8.1.3   | Die Gesetze der Energietransformation .....  | 196 |
| 8.2   | Die Spontaneität einer Reaktion hängt von der Änderung ihrer freien Enthalpie ab .....       | 198 |
| 8.2.1   | Die Änderung der freien Enthalpie ( $\Delta G$ ) .....                                       | 199 |
| 8.2.2   | Freie Enthalpie, Stabilität und chemisches Gleichgewicht .....                               | 199 |
| 8.2.3   | Freie Enthalpie und Stoffwechsel .....   | 201 |
| 8.3   | ATP ermöglicht Zellarbeit durch die Kopplung von exergonen an endergone Reaktionen .....     | 203 |
| 8.3.1   | Struktur und Hydrolyse von ATP .....   | 203 |
| 8.3.2   | Wie ATP Arbeit leistet .....   | 204 |
| 8.3.3   | Die Regeneration des ATP .....   | 204 |
| 8.4   | Enzyme beschleunigen chemische Reaktionen durch das Absenken von Energiebarrieren .....      | 206 |
| 8.4.1   | Die Aktivierungs-Hürde .....   | 206 |
| 8.4.2   | Wie Enzyme die Aktivierungsenergie senken .....  | 207 |
| 8.4.3   | Die Substratspezifität von Enzymen .....   | 208 |
| 8.4.4   | Katalyse im aktiven Zentrum des Enzyms .....   | 209 |
| 8.4.5   | Die Abhängigkeit der Enzymaktivität von Umgebungsbedingungen ..                              | 211 |
| 8.5   | Steuerung des Stoffwechsels durch Regulation der Enzymaktivität .....                        | 213 |
| 8.5.1   | Allosterische Regulation von Enzymen .....   | 213 |
| 8.5.2   | Die spezifische Lokalisation von Enzymen in der Zelle .....                                  | 216 |
| <b>Kapitel 9 Zellatmung: Die Gewinnung chemischer Energie</b> |  | 220 |
| 9.1   | Der katabole Stoffwechsel liefert Energie durch die Oxidation organischer Brennstoffe .....  | 221 |
| 9.1.1   | Katabole Stoffwechselwege und die ATP-Produktion .....                                       | 221 |
| 9.1.2   | Redoxreaktionen: Oxidation und Reduktion .....   | 222 |
| 9.1.3   | Die Stadien der Zellatmung: Eine Vorschau .....  | 226 |
| 9.2   | Die Glykolyse oxidiert Glucose zu Pyruvat, wobei Energie frei wird .....                     | 228 |
| 9.3   | Der Citratzyklus vervollständigt die energieliefernde Oxidation organischer Moleküle .....   | 231 |
| 9.4   | Ein chemiosmotischer Prozess koppelt den Elektronentransport an die ATP-Synthese .....       | 234 |
| 9.4.1   | Der Elektronentransport-Pfad .....   | 234 |
| 9.4.2   | Energiekopplung durch einen chemiosmotischen Mechanismus .....                               | 235 |
| 9.4.3   | Eine Bilanzierung der ATP-Produktion durch die Zellatmung .....                              | 240 |
| 9.5   | Durch Gärung und anaerobe Atmung können Zellen auch ohne Sauerstoff ATP synthetisieren ..... | 241 |
| 9.5.1   | Formen der Gärung .....  | 242 |
| 9.5.2   | Ein Vergleich von Gärung und aerober Atmung .....  | 243 |
| 9.5.3   | Die Bedeutung der Glykolyse im Rahmen der Evolution .....                                    | 244 |
| 9.6   | Die Glykolyse und der Citratzyklus sind mit vielen anderen Stoffwechselwegen verknüpft ..... | 245 |

|   |   |            |
|---|---|------------|
| 9.6.1                                     | Die Vielseitigkeit des Katabolismus .....   | 245        |
| 9.6.2                                     | Biosynthesen (anabole Stoffwechselwege) .....   | 246        |
| 9.6.3                                     | Die Regulation der Zellatmung durch Rückkopplungsmechanismen .....  | 246        |
| <b>Kapitel 10 Photosynthese</b>           |   | <b>251</b> |
| 10.1                                      | Die Photosynthese wandelt Lichtenergie in chemische Energie um .....  | 253        |
| 10.1.1                                    | Chloroplasten: Die Orte der Photosynthese in Pflanzen .....   | 253        |
| 10.1.2                                    | Der Weg einzelner Atome im Verlauf der Photosynthese:<br>Wissenschaftliche Forschung .....                          | 254        |
| 10.1.3                                    | Die Wasseroxidation .....   | 255        |
| 10.1.4                                    | Zwei Stadien der Photosynthese: Eine Vorschau .....   | 256        |
| 10.2                                      | Die Lichtreaktionen wandeln Sonnenenergie in chemische Energie<br>in Form von ATP und NADPH um .....                | 258        |
| 10.2.1                                    | Die Natur des Lichtes .....   | 258        |
| 10.2.2                                    | Photosynthesepigmente: Die Lichtrezeptoren .....  | 258        |
| 10.2.3                                    | Anregung von Chlorophyll durch Licht .....  | 261        |
| 10.2.4                                    | Photosystem = Reaktionszentrum + Lichtsammelkomplex .....   | 262        |
| 10.2.5                                    | Der lineare Elektronenfluss .....   | 263        |
| 10.2.6                                    | Der zyklische Elektronenfluss .....   | 265        |
| 10.2.7                                    | Der chemiosmotische Prozess in Chloroplasten und Mitochondrien<br>im Vergleich .....                                | 266        |
| 10.3                                      | Der Calvin-Zyklus verbraucht ATP und NADPH, um CO <sub>2</sub> in Zucker<br>umzuwandeln .....                       | 268        |
| 10.4                                      | In heißen, trockenen Klimazonen haben sich alternative Mechanismen<br>der Kohlenstofffixierung herausgebildet ..... | 270        |
| 10.4.1                                    | Die Photorespiration: Ein Überbleibsel der Evolution? .....   | 271        |
| 10.4.2                                    | C <sub>4</sub> -Pflanzen .....  | 272        |
| 10.4.3                                    | CAM-Pflanzen .....  | 273        |
| 10.4.4                                    | Die Bedeutung der Photosynthese: Eine Rückschau .....   | 273        |
| <b>Kapitel 11 Zelluläre Kommunikation</b> |   | <b>279</b> |
| 11.1                                      | Externe Signale werden in intrazelluläre Antworten umgewandelt .....  | 280        |
| 11.1.1                                    | Evolution der zellulären Signalverarbeitung .....   | 280        |
| 11.1.2                                    | Die drei Stadien der zellulären Signaltransduktion: Ein Überblick .....   | 281        |
| 11.2                                      | Erkennung: Ein Signalmolekül bindet an ein Rezeptorprotein .....  | 283        |
| 11.2.1                                    | Rezeptorproteine in der Plasmamembran .....   | 283        |
| 11.2.2                                    | Intrazelluläre Rezeptorproteine .....   | 283        |
| 11.3                                      | Übertragung: Signaltransduktion durch kaskadierende Signalweiterleitung ..  | 287        |
| 11.3.1                                    | Signaltransduktionswege .....   | 287        |
| 11.3.2                                    | Proteinphosphorylierung und Proteindiphosphorylierung .....   | 287        |
| 11.3.3                                    | Niedermolekulare Moleküle und Ionen als sekundäre Botenstoffe .....   | 289        |
| 11.3.4                                    | Zyklisches AMP .....  | 289        |
| 11.4                                      | Antwort: Die Signalübertragung führt zur Regulation der Transkription<br>oder von Aktivitäten im Cytoplasma .....   | 292        |
| 11.4.1                                    | Antworten des Zellkerns und des Cytoplasmas .....   | 292        |
| 11.4.2                                    | Feinabstimmung der Antwort auf Signale .....  | 295        |
| 11.5                                      | Die Apoptose (programmierter Zelltod) geht mit der Integration<br>mehrerer Signaltransduktionswege einher .....     | 297        |
| 11.5.1                                    | Apoptose beim Fadenwurm <i>Caenorhabditis elegans</i> .....   | 298        |
| 11.5.2                                    | Apoptotische Signalwege und die Signale, die sie aktivieren .....   | 298        |

|   |            |
|---|------------|
| <b>Kapitel 12 Der Zellzyklus</b>  | <b>303</b> |
| 12.1 Aus der Zellteilung gehen genetisch identische Tochterzellen hervor .....                                      | 304        |
| 12.1.1 Die Organisation des genetischen Materials in der Zelle .....  | 305        |
| 12.1.2 Die Verteilung der Chromosomen bei der eukaryotischen Zellteilung .....                                      | 306        |
| 12.2 Der Wechsel von Mitose und Interphase im Zellzyklus .....  | 307        |
| 12.2.1 Die Phasen des Zellzyklus .....  | 307        |
| 12.2.2 Der Spindelapparat .....   | 310        |
| 12.2.3 Die Cytokinese .....   | 312        |
| 12.2.4 Zweiteilung .....  | 313        |
| 12.2.5 Die Evolution der Mitose .....   | 315        |
| 12.3 Der eukaryotische Zellzyklus wird durch ein molekulares Kontrollsystem gesteuert .....                         | 316        |
| 12.3.1 Hinweise auf die Existenz cytoplasmatischer Signale .....  | 316        |
| 12.3.2 Das Zellzyklus-Kontrollsystem .....  | 316        |
| 12.3.3 Der Verlust der Zellzyklus-Kontrolle bei Krebszellen .....   | 322        |
| <b>TEIL III Genetik</b>   | <b>327</b> |
| <b>Kapitel 13 Meiose und geschlechtliche Fortpflanzung</b>  | <b>330</b> |
| 13.1 Gene werden mit den Chromosomen von den Eltern an ihre Nachkommen weitergegeben .....                          | 332        |
| 13.1.1 Die Vererbung von Genen .....  | 332        |
| 13.1.2 Ein Vergleich von geschlechtlicher und ungeschlechtlicher Fortpflanzung .....                                | 332        |
| 13.2 Befruchtung und Meiose wechseln sich beim geschlechtlichen Generationswechsel ab .....                         | 333        |
| 13.2.1 Die Chromosomensätze menschlicher Zellen .....   | 333        |
| 13.2.2 Das Verhalten der Chromosomensätze im menschlichen Lebenszyklus .....  | 336        |
| 13.2.3 Die Vielfalt der Lebenszyklen bei der geschlechtlichen Fortpflanzung .....                                   | 336        |
| 13.3 In der Meiose wird der diploide auf einen haploiden Chromosomensatz reduziert .....                            | 338        |
| 13.3.1 Die Meiosestadien .....  | 338        |
| 13.3.2 Mitose und Meiose im Vergleich .....   | 339        |
| 13.4 Die geschlechtliche Fortpflanzung erhöht die genetische Variabilität – ein wichtiger Motor der Evolution ..... | 344        |
| 13.4.1 Ursprung der genetischen Variabilität unter Nachkommen .....   | 344        |
| 13.4.2 Die Bedeutung der genetischen Variabilität von Populationen für die Evolution .....                          | 346        |
| <b>Kapitel 14 Mendel und das Genkonzept</b>   | <b>350</b> |
| 14.1 Das wissenschaftliche Vorgehen von Mendel führte zu den Gesetzen der Vererbung .....                           | 351        |
| 14.1.1 Mendels quantitativ-experimenteller Ansatz .....   | 352        |
| 14.1.2 Die Spaltungsregel (Zweite Mendel'sche Regel) .....  | 353        |
| 14.1.3 Die Unabhängigkeitsregel (Dritte Mendel'sche Regel) .....  | 358        |
| 14.2 Die Mendel'sche Vererbung von Merkmalen unterliegt den Gesetzen der Statistik .....                            | 360        |

|        |  |     |
|--------|--|-----|
| 14.2.1 | Die Anwendung von Multiplikations- und Additionsregel auf Einfaktorkreuzungen .....            | 361 |
| 14.2.2 | Die Lösung komplexer genetischer Probleme mit den Regeln der Wahrscheinlichkeitsrechnung ..... | 362 |
| 14.3   | Die Mendel'schen Regeln sind oft unzureichend, um beobachtete Erbgänge zu erklären .....       | 363 |
| 14.3.1 | Die Erweiterung der Mendel'schen Regeln bei einzelnen Genen .....                              | 363 |
| 14.3.2 | Die Erweiterung der Mendel'schen Regeln bei mehr als einem Gen .....                           | 366 |
| 14.3.3 | Gene und Erziehung: Der Einfluss der Umwelt auf den Phänotyp .....                             | 367 |
| 14.3.4 | Eine integrierte „Mendel'sche“ Sicht auf die Vererbung und die genetische Variabilität .....   | 368 |
| 14.4   | Viele Merkmale des Menschen werden nach den Mendel'schen Regeln vererbt .....                  | 369 |
| 14.4.1 | Die Analyse von Stammbäumen .....  | 369 |
| 14.4.2 | Rezessive Erbkrankheiten .....   | 370 |
| 14.4.3 | Dominante Erbkrankheiten .....   | 373 |
| 14.4.4 | Multifaktorielle Krankheiten .....   | 374 |
| 14.4.5 | Genetische Untersuchungen und Beratung .....   | 374 |

## Kapitel 15 Chromosomen bilden die Grundlage der Vererbung

|        |   |     |
|--------|---|-----|
| 15.1   | Die Chromosomen bilden die strukturelle Grundlage der Mendel'schen Vererbung .....                                | 385 |
| 15.1.1 | Thomas Hunt Morgans Versuchsergebnisse:<br>Das wissenschaftliche Vorgehen .....                                   | 386 |
| 15.2   | Die Vererbung geschlechtsgebundener Gene .....  | 388 |
| 15.2.1 | Die Geschlechtschromosomen .....  | 389 |
| 15.2.2 | Die Vererbung geschlechtsgebundener Gene .....  | 391 |
| 15.2.3 | Die Inaktivierung eines X-Chromosoms bei weiblichen Säugetieren .....   | 392 |
| 15.3   | Die Vererbung gekoppelter Gene auf einem Chromosom .....  | 393 |
| 15.3.1 | Einfluss der Genkopplung auf die Vererbung .....  | 393 |
| 15.3.2 | Rekombination und Kopplung .....  | 393 |
| 15.3.3 | Die Kartierung von Genen anhand von Rekombinationshäufigkeiten:<br>Wissenschaftliches Vorgehen .....              | 394 |
| 15.4   | Abweichungen in Chromosomenzahl oder -struktur verursachen einige bekannte Erbkrankheiten .....                   | 398 |
| 15.4.1 | Abweichende Chromosomenzahlen .....   | 398 |
| 15.4.2 | Abweichende Chromosomenstrukturen .....   | 400 |
| 15.4.3 | Menschliche Erbkrankheiten, die auf Veränderungen in der Chromosomenzahl oder -struktur zurückzuführen sind ..... | 400 |
| 15.5   | Von der Chromosomentheorie abweichende Erbgänge .....   | 403 |
| 15.5.1 | Genomische Prägung .....  | 403 |
| 15.5.2 | Genome von Organellen und ihre Vererbung .....  | 404 |

## Kapitel 16 Die molekularen Grundlagen der Vererbung

|        |  |     |
|--------|--|-----|
| 16.1   | Die DNA ist die Erbsubstanz .....  | 410 |
| 16.1.1 | Die Suche nach der Erbsubstanz: Wissenschaftliche Forschung .....          | 410 |
| 16.1.2 | Ein Strukturmodell der DNA: Wissenschaftliche Forschung .....              | 414 |
| 16.2   | Viele Proteine kooperieren bei der Replikation und Reparatur der DNA ..... | 417 |
| 16.2.1 | Das Grundprinzip: Basenpaarung mit einem Matrizenstrang .....              | 417 |
| 16.2.2 | Die molekularen Mechanismen der DNA-Replikation .....                      | 418 |
| 16.2.3 | Korrekturlesen und DNA-Reparatur .....                                     | 424 |
| 16.2.4 | Die Replikation der Enden linearer DNA-Moleküle .....                      | 426 |
| 16.3   | Ein Chromosom besteht aus einem mit Proteinen verpackten DNA-Molekül ..... | 428 |

## Kapitel 17 Vom Gen zum Protein

|        |   |     |
|--------|---|-----|
| 17.1   | Die Verbindung von Genen und Proteinen über Transkription und Translation . . . . . | 436 |
| 17.1.1 | Die Untersuchung von Stoffwechselstörungen . . . . .                                | 436 |
| 17.1.2 | Die Grundlagen der Transkription und Translation . . . . .                          | 439 |
| 17.1.3 | Der genetische Code . . . . .   | 441 |
| 17.2   | Transkription – die DNA-abhängige RNA-Synthese: Eine nähere Betrachtung . . . . .   | 444 |
| 17.2.1 | Die molekularen Komponenten des Transkriptionsapparates . . . . .                   | 444 |
| 17.2.2 | Synthese eines RNA-Transkriptes . . . . .   | 446 |
| 17.3   | Eukaryotische Zellen modifizieren mRNA-Moleküle nach der Transkription . . . . .    | 447 |
| 17.3.1 | Veränderung der Enden einer eukaryotischen mRNA . . . . .                           | 447 |
| 17.3.2 | Mosaikgene und RNA-Spleißen . . . . .   | 448 |
| 17.4   | Translation – die RNA-abhängige Polypeptidsynthese:                                 |     |
|        | Eine nähere Betrachtung . . . . .   | 451 |
| 17.4.1 | Die molekularen Komponenten des Translationsapparates . . . . .                     | 451 |
| 17.4.2 | Die Biosynthese von Polypeptiden . . . . .  | 455 |
| 17.4.3 | Vom Polypeptid zum funktionsfähigen Protein . . . . .                               | 457 |
| 17.5   | Punktmutationen können die Struktur und Funktion                                    |     |
|        | eines Proteins beeinflussen . . . . .   | 459 |
| 17.5.1 | Formen der Punktmutation . . . . .  | 460 |
| 17.5.2 | Mutagene . . . . .  | 461 |
| 17.6   | Das Genkonzept gilt universell für alle Lebewesen, nicht aber                       |     |
|        | die Mechanismen der Genexpression . . . . .   | 462 |
| 17.6.1 | Ein Vergleich der Genexpression bei Bakterien, Archaeen                             |     |
|        | und Eukaryonten . . . . .   | 462 |
| 17.6.2 | Was ist ein Gen? Eine neue Betrachtung . . . . .                                    | 463 |

## Kapitel 18 Regulation der Genexpression

|        |  |     |
|--------|--|-----|
| 18.1   | Bakterien reagieren auf wechselnde Umweltbedingungen häufig            |     |
|        | mit Transkriptionsveränderungen . . . . .                              | 469 |
| 18.1.1 | Das Operon-Konzept . . . . .   | 470 |
| 18.1.2 | Reprimierbare und induzierbare Operone:                                |     |
|        | Zwei Formen der negativen Regulation der Genexpression . . . . .       | 472 |
| 18.1.3 | Positive Regulation der Genexpression . . . . .                        | 474 |
| 18.2   | Die Expression eukaryotischer Gene kann auf verschiedenen Stufen       |     |
|        | reguliert werden . . . . .   | 475 |
| 18.2.1 | Differenzielle Genexpression . . . . .                                 | 475 |
| 18.2.2 | Regulation der Chromatinstruktur . . . . .                             | 476 |
| 18.2.3 | Regulation der Transkriptionsinitiation . . . . .                      | 479 |
| 18.2.4 | Mechanismen der posttranskriptionalen Regulation . . . . .             | 483 |
| 18.3   | Die Regulation der Genexpression durch nicht-codierende RNAs . . . . . | 485 |
| 18.3.1 | Die Wirkung von Mikro-RNAs und kleinen interferierenden RNAs           |     |
|        | auf die mRNA . . . . .   | 486 |
| 18.3.2 | Chromatinumbau und Stilllegung der Transkription                       |     |
|        | durch kleine RNAs . . . . .  | 487 |
| 18.4   | Ein Programm zur differenziellen Genexpression bedingt das Auftreten   |     |
|        | verschiedener Zelltypen in einem Lebewesen . . . . .                   | 487 |
| 18.4.1 | Ein genetisches Programm für die Embryonalentwicklung . . . . .        | 488 |
| 18.4.2 | Cytoplasmatische Determinanten und Induktionssignale . . . . .         | 488 |
| 18.4.3 | Die schrittweise Regulation der Genexpression                          |     |
|        | während der Zelldifferenzierung . . . . .                              | 489 |
| 18.4.4 | Musterbildung zur Festlegung des Körperbaus . . . . .                  | 491 |

|        |  |     |
|--------|--|-----|
| 18.5   | Krebs entsteht durch genetische Veränderungen, die den Zellzyklus deregulieren . . . . . | 496 |
| 18.5.1 | Gene und Krebs . . . . .   | 496 |
| 18.5.2 | Die Störung zellulärer Signalketten . . . . .  | 498 |
| 18.5.3 | Das Mehrstufenmodell der Krebsentstehung . . . . .                                       | 498 |
| 18.5.4 | Genetische Veranlagung und andere krebsfördernde Faktoren . . . . .                      | 500 |

## Kapitel 19 Viren 506

|        |  |     |
|--------|--|-----|
| 19.1   | Ein Virus besteht aus einer von einer Proteinhülle eingeschlossenen Nucleinsäure . . . . . | 507 |
| 19.1.1 | Die Entdeckung der Viren: Ein wissenschaftlicher Exkurs . . . . .                          | 508 |
| 19.1.2 | Der Aufbau von Viren . . . . .   | 509 |
| 19.2   | Viren vermehren sich nur in Wirtszellen . . . . .  | 510 |
| 19.2.1 | Grundlagen der Virenvermehrung . . . . .   | 511 |
| 19.2.2 | Die Phagenvermehrung . . . . .   | 512 |
| 19.2.3 | Vermehrungszyklen von Tierviren . . . . .  | 514 |
| 19.2.4 | Die Evolution von Viren . . . . .  | 517 |
| 19.3   | Viren, Viroide und Prionen als Pathogene von Tieren und Pflanzen . . . . .                 | 519 |
| 19.3.1 | Viruserkrankungen von Tieren . . . . .   | 519 |
| 19.3.2 | Das Auftreten neuer Viren . . . . .  | 520 |
| 19.3.3 | Viruserkrankungen bei Pflanzen . . . . .   | 522 |
| 19.3.4 | Viroide und Prionen: Die einfachsten Krankheitserreger . . . . .                           | 523 |

## Kapitel 20 Biotechnologie 527

|        |   |     |
|--------|---|-----|
| 20.1   | Die DNA-Klonierung liefert viele Kopien eines Gens oder anderer DNA-Abschnitte . . . . .                            | 529 |
| 20.1.1 | DNA-Klonierung und ihre Anwendungen: Ein Überblick . . . . .  | 529 |
| 20.1.2 | Der Einsatz von Restriktionsendonukleasen zur Herstellung rekombinanter DNA . . . . .                               | 529 |
| 20.1.3 | Die Klonierung eines eukaryotischen Gens in einem bakteriellen Plasmid . . . . .                                    | 531 |
| 20.1.4 | Die Expression klonierter Eukaryontengene . . . . .   | 536 |
| 20.1.5 | Die <i>in vitro</i> -Amplifikation von DNA: Polymerasekettenreaktion (PCR) . . . . .                                | 538 |
| 20.2   | Die Gentechnik erlaubt die Untersuchung der Sequenz, der Expression und der Funktion eines Gens . . . . .           | 540 |
| 20.2.1 | Gelelektrophorese und Southern-Blotting . . . . .   | 540 |
| 20.2.2 | DNA-Sequenzierung . . . . .   | 544 |
| 20.2.3 | Genexpressionsanalyse . . . . .   | 544 |
| 20.2.4 | Ermittlung der Funktion eines Genprodukts . . . . .   | 548 |
| 20.3   | Die Klonierung von Organismen zur Bereitstellung von Stammzellen für die Forschung und andere Anwendungen . . . . . | 549 |
| 20.3.1 | Die Klonierung von Pflanzen aus Einzelzellkulturen . . . . .  | 550 |
| 20.3.2 | Die Klonierung von Tieren: Zellkerentransplantation . . . . .   | 551 |
| 20.3.3 | Tierische Stammzellen . . . . .   | 553 |
| 20.4   | Gentechnische Anwendungen beeinflussen unser Leben . . . . .  | 555 |
| 20.4.1 | Medizinische Anwendungen . . . . .  | 555 |
| 20.4.2 | Genetische Profile in der Gerichtsmedizin . . . . .   | 559 |
| 20.4.3 | Umweltsanierung . . . . .   | 561 |
| 20.4.4 | Landwirtschaftliche Anwendungen . . . . .   | 561 |
| 20.4.5 | Gentechnologie: Sicherheitsbedenken und ethische Fragen . . . . .   | 563 |

# Kapitel 21 Genome und ihre Evolution

|        |   |     |
|--------|---|-----|
| 21.1   | Neue Ansätze zur schnelleren Genomsequenzierung . . . . .   | 570 |
| 21.1.1 | Der Dreistufenansatz der Genomsequenzierung . . . . .   | 570 |
| 21.1.2 | Die Schrotschussmethode zur Genomsequenzierung . . . . .  | 571 |
| 21.2   | Genomanalyse mithilfe der Bioinformatik . . . . .   | 572 |
| 21.2.1 | Zentralisierte Ressourcen zur Analyse von Genomsequenzen . . . . .                                  | 573 |
| 21.2.2 | Das Aufspüren proteincodierender Gene in DNA-Sequenzen . . . . .                                    | 573 |
| 21.2.3 | Untersuchungen von Genen und ihren Produkten<br>in komplexen Systemen . . . . .                     | 575 |
| 21.3   | Genome unterscheiden sich in der Größe und der Zahl der Gene<br>sowie in der Gendichte . . . . .    | 577 |
| 21.3.1 | Genomgröße . . . . .  | 577 |
| 21.3.2 | Genzahl . . . . .   | 577 |
| 21.3.3 | Gendichte und nicht-codierende DNA . . . . .  | 578 |
| 21.4   | Eukaryotische Vielzeller besitzen viel nicht-codierende DNA<br>und viele Multigenfamilien . . . . . | 579 |
| 21.4.1 | Transponierbare Elemente und verwandte Sequenzen . . . . .  | 580 |
| 21.4.2 | Andere repetitive DNA-Sequenzen . . . . .   | 582 |
| 21.4.3 | Gene und Multigenfamilien . . . . .   | 582 |
| 21.5   | Genomevolution durch Duplikation, Umlagerung und Mutation der DNA . . . . .                         | 584 |
| 21.5.1 | Duplikation ganzer Chromosomensätze . . . . .   | 584 |
| 21.5.2 | Veränderungen der Chromosomenstruktur . . . . .   | 584 |
| 21.5.3 | Duplikation und Divergenz einzelner Gene . . . . .  | 585 |
| 21.5.4 | Umlagerungen von Genteilen: Exonduplikation und Exonaustausch<br>(„Exon-shuffling“) . . . . .       | 587 |
| 21.5.5 | Wie transponierbare genetische Elemente<br>zur Genomevolution beitragen . . . . .                   | 588 |
| 21.6   | Ein Vergleich von Genomsequenzen . . . . .  | 589 |
| 21.6.1 | Genomvergleiche . . . . .   | 589 |
| 21.6.2 | Vergleich von Entwicklungsprozessen . . . . .   | 593 |

# TEIL IV Evolutionsmechanismen

|        |  |     |
|--------|--|-----|
|        | Kapitel 22 Evolutionstheorie: Die darwinistische Sicht des Lebens  | 599 |
| 22.1   | Die Darwin'sche Theorie widersprach der traditionellen Ansicht,<br>die Erde sei jung und von unveränderlichen Arten bewohnt . . . . .                          | 602 |
| 22.1.1 | <i>Scala naturae</i> und die Klassifikation der Arten . . . . .  | 604 |
| 22.1.2 | Vorstellungen über die Veränderungen von Organismen<br>im Lauf der Zeit . . . . .  | 605 |
| 22.1.3 | Lamarcks Evolutionstheorie . . . . .   | 605 |
| 22.2   | Evolutionstheorie: Gemeinsame Abstammung, Variationen zwischen<br>den Individuen und natürliche Selektion erklären die Anpassungen<br>von Organismen . . . . . | 606 |
| 22.2.1 | Darwins Feldforschung . . . . .  | 607 |
| 22.2.2 | Die Entstehung der Arten . . . . .   | 610 |
| 22.3   | Die Evolutionstheorie wird durch eine Vielzahl<br>wissenschaftlicher Befunde gestützt . . . . .  | 615 |
| 22.3.1 | Direkte Beobachtungen evolutiver Veränderungen . . . . .   | 615 |
| 22.3.2 | Fossilbelege . . . . .   | 617 |
| 22.3.3 | Homologie . . . . .  | 619 |

|  |  |            |
|--|--|------------|
| 22.3.4   | Biogeografie . . . . .   | 622        |
| 22.3.5   | Ist die darwinistische Sichtweise der phylogenetischen Entwicklung der Organismen zu theoretisch? . . . . .            | 623        |
| <b>Kapitel 23 Die Evolution von Populationen</b> |  | <b>627</b> |
| 23.1   | Mutation und sexuelle Fortpflanzung sorgen für die genetische Variabilität, die Evolution möglich macht . . . . .      | 628        |
| 23.1.1   | Genetische Variabilität . . . . .  | 629        |
| 23.1.2   | Mutation . . . . .   | 631        |
| 23.1.3   | Sexuelle Fortpflanzung und Rekombination . . . . .   | 632        |
| 23.2   | Mithilfe der Hardy-Weinberg-Gleichung lässt sich herausfinden, ob in einer Population Evolution stattfindet . . . . .  | 633        |
| 23.2.1   | Genpool und Allelfrequenzen . . . . .  | 633        |
| 23.2.2   | Das Hardy-Weinberg-Gesetz . . . . .  | 634        |
| 23.3   | Natürliche Selektion, genetische Drift und Genfluss können die Allelfrequenzen in einer Population verändern . . . . . | 638        |
| 23.3.1   | Natürliche Selektion . . . . .   | 638        |
| 23.3.2   | Genetische Drift . . . . .   | 638        |
| 23.3.3   | Genfluss . . . . .   | 641        |
| 23.4   | Die natürliche Selektion ist der einzige Mechanismus, der auf Dauer für eine adaptive Evolution sorgt . . . . .        | 643        |
| 23.4.1   | Eine nähere Analyse der natürlichen Selektion . . . . .  | 643        |
| 23.4.2   | Die Schlüsselrolle der natürlichen Selektion bei der adaptiven Evolution . . . . .                                     | 645        |
| 23.4.3   | Sexuelle Selektion . . . . .   | 646        |
| 23.4.4   | Erhaltung der genetischen Variabilität . . . . .   | 647        |
| 23.4.5   | Warum die natürliche Selektion keine „perfekten“ Organismen hervorbringen kann . . . . .                               | 650        |
| <b>Kapitel 24 Die Entstehung der Arten</b>       |  | <b>654</b> |
| 24.1   | Das biologische Artkonzept betont die reproduktiven Isolationsmechanismen . . . . .                                    | 655        |
| 24.1.1   | Das biologische Artkonzept . . . . .   | 656        |
| 24.1.2   | Weitere alternative Artkonzepte . . . . .  | 658        |
| 24.2   | Artbildung mit und ohne geografische Isolation . . . . .   | 659        |
| 24.2.1   | Allopatrische Artbildung . . . . .   | 662        |
| 24.2.2   | Sympatrische Artbildung . . . . .  | 665        |
| 24.2.3   | Allopatrische und sympatrische Artbildung: Eine Zusammenfassung . . . . .  | 667        |
| 24.3   | Hybridzonen ermöglichen die Analyse von Faktoren, die zur reproduktiven Isolation führen . . . . .                     | 668        |
| 24.3.1   | Evolutionsprozesse in Hybridzonen . . . . .  | 669        |
| 24.3.2   | Zeitliche Entwicklung von Hybridzonen . . . . .  | 670        |
| 24.4   | Artbildung kann schnell oder langsam erfolgen und aus Veränderungen weniger oder vieler Gene resultieren . . . . .     | 673        |
| 24.4.1   | Der zeitliche Verlauf der Artbildung . . . . .   | 673        |
| 24.4.2   | Die Genetik der Artbildung . . . . .   | 675        |
| 24.4.3   | Von der Artbildung zur Makroevolution . . . . .  | 676        |
| <b>Kapitel 25 Vergangene Welten</b>              |  | <b>680</b> |
| 25.1   | Die Bedingungen auf der jungen Erde ermöglichten die Entstehung des Lebens . . . . .                                   | 681        |
| 25.1.1   | Synthese organischer Verbindungen zu Beginn der Erdentwicklung . . . . .   | 682        |

|        |  |     |
|--------|--|-----|
| 25.1.2 | Abiotische Synthese von Makromolekülen . . . . .   | 683 |
| 25.1.3 | Probionten . . . . .   | 683 |
| 25.1.4 | Selbstreplizierende RNA und die Anfänge der natürlichen Selektion . . . . .  | 684 |
| 25.2   | Fossilfunde dokumentieren die Geschichte des Lebens . . . . .  | 685 |
| 25.2.1 | Die Fossilfunde . . . . .  | 685 |
| 25.2.2 | Datierung von Gesteinen und Fossilien . . . . .  | 685 |
| 25.2.3 | Die Entstehung neuer Organismengruppen . . . . .   | 687 |
| 25.3   | Zu den Schlüsselereignissen in der Evolution gehören die Entstehung einzelliger und vielzelliger Organismen sowie die Besiedlung des Festlands . . . . . | 689 |
| 25.3.1 | Die ersten einzelligen Organismen . . . . .  | 689 |
| 25.3.2 | Der Ursprung der Vielzelligkeit . . . . .  | 692 |
| 25.3.3 | Die Besiedlung des Festlands . . . . .   | 694 |
| 25.4   | Aufstieg und Niedergang dominanter Gruppen in Zusammenhang mit Kontinentaldrift, Massenaussterben und adaptiver Radiation . . . . .                      | 695 |
| 25.4.1 | Kontinentaldrift . . . . .   | 695 |
| 25.4.2 | Massenaussterben . . . . .   | 698 |
| 25.4.3 | Adaptive Radiationen . . . . .   | 701 |
| 25.5   | Veränderungen im Körperbau können durch Änderungen in der Sequenz und Regulation von Entwicklungsgenen entstehen . . . . .                               | 703 |
| 25.5.1 | Evolutionäre Effekte von Entwicklungsgenen . . . . .   | 703 |
| 25.5.2 | Evolution von Entwicklungsprozessen . . . . .  | 705 |
| 25.6   | Evolution ist nicht zielorientiert . . . . .   | 708 |
| 25.6.1 | Evolutionäre Neuerungen . . . . .  | 708 |
| 25.6.2 | Evolutionäre Trends . . . . .  | 709 |

## TEIL V Die Evolutionsgeschichte der biologischen Vielfalt

715

### Kapitel 26 Der phylogenetische Stammbaum der Lebewesen

718

|        |  |     |
|--------|--|-----|
| 26.1   | Phylogenie als Spiegelbild stammesgeschichtlicher Verwandtschaftsbeziehungen . . . . .               | 720 |
| 26.1.1 | Die binomiale Nomenklatur . . . . .  | 720 |
| 26.1.2 | Hierarchische Klassifikation . . . . .   | 721 |
| 26.1.3 | Der Zusammenhang zwischen Klassifikation und Phylogenie . . . . .                                    | 722 |
| 26.1.4 | Was sagen phylogenetische Stammbäume aus? . . . . .  | 723 |
| 26.1.5 | Der Nutzen der Phylogenie . . . . .  | 724 |
| 26.2   | Die Ableitung der Stammesgeschichte aus morphologischen und molekularbiologischen Befunden . . . . . | 725 |
| 26.2.1 | Morphologische und molekulare Homologien . . . . .   | 725 |
| 26.2.2 | Homologie und Analogie . . . . .   | 726 |
| 26.2.3 | Bewertung molekularer Homologien . . . . .   | 727 |
| 26.3   | Die Rekonstruktion phylogenetischer Stammbäume anhand gemeinsamer Merkmale . . . . .                 | 728 |
| 26.3.1 | Kladistik . . . . .  | 728 |
| 26.3.2 | Phylogenetische Stammbäume mit proportionaler Länge der Äste . . . . .                               | 731 |
| 26.3.3 | Maximale Parsimonie und maximale Wahrscheinlichkeit . . . . .  | 732 |
| 26.3.4 | Phylogenetische Stammbäume als Hypothesen . . . . .  | 733 |
| 26.4   | Das Genom als Beleg für die evolutive Vergangenheit eines Lebewesens . . . . .                       | 733 |
| 26.4.1 | Genduplikationen und Genfamilien . . . . .   | 735 |
| 26.4.2 | Evolution von Genomen . . . . .  | 736 |
| 26.5   | Mit molekularen Uhren kann man den zeitlichen Ablauf der Evolution verfolgen . . . . .               | 737 |

737

|  |  |            |
|--|--|------------|
| 26.5.1                                 | Molekulare Uhren . . . . .   | 737        |
| 26.5.2                                 | Mithilfe der molekularen Uhr aufgeklärt: Der Ursprung von HIV . . . . .  | 739        |
| 26.6                                   | Neue Befunde und die Weiterentwicklung unserer Kenntnisse über den Stammbaum der Organismen . . . . .                      | 740        |
| 26.6.1                                 | Von zwei Organismenreichen zu drei Domänen . . . . .   | 740        |
| 26.6.2                                 | Ein einfacher Stammbaum für alle Organismen . . . . .  | 741        |
| 26.6.3                                 | Der Baum des Lebens: Ein Ring? . . . . .   | 742        |
| <b>Kapitel 27 Bacteria und Archaea</b> |  | <b>746</b> |
| 27.1                                   | Das Erfolgsrezept der Prokaryonten:<br>Strukturelle und funktionelle Anpassungen . . . . .                                 | 747        |
| 27.1.1                                 | Zelloberflächenstrukturen . . . . .  | 748        |
| 27.1.2                                 | Beweglichkeit . . . . .  | 749        |
| 27.1.3                                 | Innerer Aufbau und Genomorganisation . . . . .   | 751        |
| 27.1.4                                 | Fortpflanzung und Anpassung . . . . .  | 752        |
| 27.2                                   | Schnelle Vermehrung, Mutation und Neukombination von Genen als Ursache der genetischen Vielfalt von Prokaryonten . . . . . | 754        |
| 27.2.1                                 | Schnelle Vermehrung und Mutation . . . . .   | 754        |
| 27.2.2                                 | Neukombination von Genen . . . . .   | 754        |
| 27.3                                   | Die Evolution vielfältiger Anpassungen in der Ernährung und im Stoffwechsel von Prokaryonten . . . . .                     | 757        |
| 27.3.1                                 | Die Rolle des Sauerstoffs im Stoffwechsel . . . . .  | 759        |
| 27.3.2                                 | Stickstoff-Stoffwechsel . . . . .  | 759        |
| 27.3.3                                 | Kooperation im Stoffwechsel . . . . .  | 759        |
| 27.4                                   | Die Phylogenie der Prokaryonten, aufgeklärt mit molekularer Systematik . . . . .   | 760        |
| 27.4.1                                 | Erkenntnisse der molekularen Systematik . . . . .  | 760        |
| 27.4.2                                 | Stammbeigiff bei Prokaryonten . . . . .  | 761        |
| 27.4.3                                 | Artbestimmung mit molekularen Methoden . . . . .   | 761        |
| 27.4.4                                 | Kultivierbarkeit von Prokaryonten und Phylogenie nicht kultivierter Prokaryontenarten . . . . .                            | 761        |
| 27.4.5                                 | Der phylogenetische Stammbaum der Prokaryonten . . . . .   | 762        |
| 27.4.6                                 | Archaea . . . . .  | 763        |
| 27.4.7                                 | Bacteria . . . . .   | 764        |
| 27.5                                   | Kommunikation mit der Umwelt . . . . .   | 768        |
| 27.5.1                                 | Zweikomponentensysteme . . . . .   | 769        |
| 27.5.2                                 | Molekulare Vorgänge bei der Chemotaxis . . . . .   | 770        |
| 27.6                                   | Die entscheidende Bedeutung der Prokaryonten für die Biosphäre . . . . .   | 772        |
| 27.6.1                                 | Chemisches Recycling . . . . .   | 772        |
| 27.6.2                                 | Wechselwirkungen mit anderen Organismen . . . . .  | 773        |
| 27.7                                   | Schädliche und nützliche Auswirkungen der Prokaryonten auf den Menschen . . . . .  | 774        |
| 27.7.1                                 | Bakterielle Krankheitserreger . . . . .  | 774        |
| 27.7.2                                 | Prokaryonten in Forschung und Technik . . . . .  | 775        |
| <b>Kapitel 28 Protisten</b>            |  | <b>780</b> |
| 28.1                                   | Die meisten Eukaryonten sind Einzeller . . . . .   | 781        |
| 28.1.1                                 | Struktur- und Funktionsvielfalt bei Protisten . . . . .  | 782        |
| 28.1.2                                 | Endosymbiose in der Evolution der Eukaryonten . . . . .  | 782        |
| 28.1.3                                 | Die fünf Übergruppen der Eukaryonten . . . . .   | 783        |
| 28.2                                   | Excavata: Protisten mit abgewandelten Mitochondrien und bemerkenswerten Flagellen . . . . .                                | 784        |
| 28.2.1                                 | Diplomonada und Parabasalia . . . . .  | 784        |
| 28.2.2                                 | Euglenozoa . . . . .   | 785        |

|  |  |     |
|--|--|-----|
| 28.3   | Chromalveolata sind wahrscheinlich durch sekundäre Endosymbiose entstanden . . . . .                   | 789 |
| 28.3.1   | Alveolata . . . . .  | 789 |
| 28.3.2   | Stramenopilata . . . . .   | 791 |
| 28.4   | Rhizaria: Eine vielgestaltige Gruppe von Protisten, definiert durch Ähnlichkeiten in der DNA . . . . . | 797 |
| 28.4.1   | Foraminifera . . . . .   | 797 |
| 28.4.2   | Radiolaria . . . . .   | 798 |
| 28.5   | Die engsten Verwandten der Landpflanzen: Rot- und Grünalgen . . . . .                                  | 798 |
| 28.5.1   | Rhodophyta . . . . .   | 799 |
| 28.5.2   | „Grünalgen“ . . . . .  | 799 |
| 28.6   | Unikonta: Protisten, die eng mit Pilzen und Tieren verwandt sind . . . . .                             | 801 |
| 28.6.1   | Amoebozoa . . . . .  | 802 |
| 28.6.2   | Opisthokonta . . . . .   | 804 |
| 28.7   | Protisten als wichtige Komponenten ökologischer Wechselbeziehungen . . . . .                           | 805 |
| 28.7.1   | Symbiotische und parasitische Protisten . . . . .  | 806 |
| 28.7.2   | Photosynthetisch aktive Protisten . . . . .  | 806 |
| <b>Kapitel 29 Die Vielfalt der Pflanzen I: Wie Pflanzen das Land eroberten</b> |  | 811 |
| 29.1   | Die Entstehung der Landpflanzen aus Grünalgen . . . . .  | 812 |
| 29.1.1   | Morphologische und molekularbiologische Befunde . . . . .  | 812 |
| 29.1.2   | Notwendige Anpassungen beim Übergang an Land . . . . .   | 813 |
| 29.1.3   | Schlüsselinnovationen bei Landpflanzen . . . . .   | 814 |
| 29.1.4   | Ursprung und Radiation der Landpflanzen . . . . .  | 815 |
| 29.2   | Moose haben einen vom Gametophyten dominierten Lebenszyklus . . . . .                                  | 820 |
| 29.2.1   | Die Gametophyten der Bryophyten . . . . .  | 820 |
| 29.2.2   | Die Sporophyten der Bryophyten . . . . .   | 822 |
| 29.2.3   | Die ökologische und ökonomische Bedeutung der Moose . . . . .  | 824 |
| 29.3   | Die ersten hochwüchsigen Pflanzen: Farne und andere<br>samenlose Gefäßpflanzen . . . . .               | 825 |
| 29.3.1   | Entstehung und Merkmale der Gefäßpflanzen . . . . .  | 826 |
| 29.3.2   | Klassifikation der samenlosen Gefäßpflanzen<br>(Pteridophyten, Farngewächse) . . . . .                 | 829 |
| 29.3.3   | Die Bedeutung der samenlosen Gefäßpflanzen . . . . .   | 831 |
| <b>Kapitel 30 Die Vielfalt der Pflanzen II: Evolution der Samenpflanzen</b>    |  | 835 |
| 30.1   | Samen und Pollen: Schlüsselanpassungen an das Landleben . . . . .                                      | 836 |
| 30.1.1   | Vorteile reduzierter Gametophyten . . . . .  | 837 |
| 30.1.2   | Heterosporie ist bei Samenpflanzen die Regel . . . . .   | 837 |
| 30.1.3   | Samenanlagen und die Produktion der Eizellen . . . . .   | 838 |
| 30.1.4   | Pollen und die Bildung von Spermazellen . . . . .  | 838 |
| 30.1.5   | Der Vorteil von Samen in der Evolution der Landpflanzen . . . . .                                      | 839 |
| 30.2   | Die Zapfen der Gymnospermen tragen „nackte“, direkt zugängliche<br>Samenanlagen . . . . .              | 839 |
| 30.2.1   | Die Evolution der Gymnospermen . . . . .   | 839 |
| 30.2.2   | Der Entwicklungszyklus einer Kiefer . . . . .  | 840 |
| 30.3   | Die wichtigsten Weiterentwicklungen der Angiospermen sind<br>Blüten und Früchte . . . . .              | 844 |
| 30.3.1   | Merkmale der Angiospermen . . . . .  | 844 |
| 30.3.2   | Die Evolution der Angiospermen . . . . .   | 848 |
| 30.3.3   | Die Vielfalt der Angiospermen . . . . .  | 849 |
| 30.3.4   | Evolutionäre Konsequenzen der Wechselwirkungen<br>zwischen Angiospermen und Tieren . . . . .           | 852 |

|   |   |            |
|---|---|------------|
| 30.4  | Die Bedeutung der Samenpflanzen für die Menschheit .....  | 853        |
| 30.4.1  | Produkte aus Samenpflanzen .....  | 853        |
| 30.4.2  | Gefahren für die Artenvielfalt der Pflanzen .....   | 854        |
| <b>Kapitel 31 Pilze</b>   |   | <b>858</b> |
| 31.1  | Pilze sind heterotroph und nehmen ihre Nährstoffe durch Absorption auf .....  | 859        |
| 31.1.1  | Ernährung und Ökologie .....  | 859        |
| 31.1.2  | Körperbau .....   | 860        |
| 31.2  | Pilze bilden während der geschlechtlichen oder der ungeschlechtlichen Vermehrung Sporen .....                         | 862        |
| 31.2.1  | Geschlechtliche Fortpflanzung .....   | 863        |
| 31.2.2  | Ungeschlechtliche Vermehrung .....  | 863        |
| 31.3  | Die Entwicklung der Pilze aus einem im Wasser lebenden begeißelten Protisten .....                                    | 864        |
| 31.3.1  | Der Ursprung der Pilze .....  | 864        |
| 31.3.2  | Sind Mikrosporidien eng mit den Pilzen verwandt? .....  | 865        |
| 31.3.3  | Der Wechsel auf das trockene Land .....   | 865        |
| 31.4  | Die verschiedenen Abstammungslinien der Pilze .....   | 866        |
| 31.4.1  | Chytridien .....  | 866        |
| 31.4.2  | Zygomyceten .....   | 866        |
| 31.4.3  | Glomerulomyceten .....  | 869        |
| 31.4.4  | Ascomyceten .....   | 869        |
| 31.4.5  | Basidiomyceten .....  | 870        |
| 31.5  | Die zentrale Bedeutung der Pilze für Stoffkreisläufe, ökologische Wechselbeziehungen und den Menschen .....           | 873        |
| 31.5.1  | Pilze als Destruenten .....   | 873        |
| 31.5.2  | Pilze als Mutualisten .....   | 873        |
| 31.5.3  | Pilze als Krankheitserreger .....   | 876        |
| 31.5.4  | Der praktische Nutzen von Pilzen .....  | 877        |
| <b>Kapitel 32 Eine Einführung in die Diversität und Evolution der Metazoa</b> |   | <b>882</b> |
| 32.1  | Metazoa sind vielzellige heterotrophe Eukaryonten mit Geweben, die sich aus embryonalen Keimblättern entwickeln ..... | 883        |
| 32.1.1  | Ernährungsweise .....   | 883        |
| 32.1.2  | Zellstruktur und Zellspezialisierung .....  | 884        |
| 32.1.3  | Fortpflanzung und Entwicklung .....   | 884        |
| 32.2  | Die Evolutionsgeschichte der Metazoa umfasst mehr als eine halbe Milliarde Jahre .....                                | 886        |
| 32.2.1  | Neoproterozoikum (vor einer Milliarde bis 542 Millionen Jahren) .....   | 886        |
| 32.2.2  | Paläozoikum (vor 542–251 Millionen Jahren) .....  | 887        |
| 32.2.3  | Mesozoikum (vor 251–65,5 Millionen Jahren) .....  | 888        |
| 32.2.4  | Känozoikum (vor 65,5 Millionen Jahren bis zur Gegenwart) .....  | 888        |
| 32.3  | Metazoa lassen sich über „Baupläne“ beschreiben .....   | 888        |
| 32.3.1  | Symmetrie .....   | 890        |
| 32.3.2  | Gewebe .....  | 890        |
| 32.3.3  | Leibeshöhlen .....  | 891        |
| 32.3.4  | Proterostome und deuterostome Entwicklung .....   | 892        |
| 32.4  | Aus den molekularen Daten erwachsen neue Erkenntnisse über die Phylogenie .....                                       | 893        |
| 32.4.1  | Übereinstimmungen .....   | 894        |
| 32.4.2  | Fortschritte bei der Entschlüsselung der phylogenetischen Beziehungen innerhalb der Bilateria .....                   | 895        |
| 32.4.3  | Die Zukunft der Systematik der Metazoa .....  | 897        |

## Kapitel 33 Wirbellose Tiere

|        |   |     |
|--------|---|-----|
| 33.1   | Schwämme sind Tiere ohne echte Gewebe . . . . .   | 905 |
| 33.2   | Cnidaria bilden eine phylogenetisch alte Metazoengruppe . . . . .   | 906 |
| 33.2.1 | Hydrozoa . . . . .  | 908 |
| 33.2.2 | Scyphozoa . . . . .   | 909 |
| 33.2.3 | Cubozoa . . . . .   | 909 |
| 33.2.4 | Anthozoa . . . . .  | 910 |
| 33.3   | Lophotrochozoa, ein Taxon, das anhand molekularer Daten identifiziert wurde, weist das breiteste Spektrum aller Baupläne im Tierreich auf . . . . . | 910 |
| 33.3.1 | Plathelminthes . . . . .  | 911 |
| 33.3.2 | Rotatoria (Rotifera) . . . . .  | 914 |
| 33.3.3 | Tentaculata: Bryozoa und Brachiopoda . . . . .  | 915 |
| 33.3.4 | Mollusca (Weichtiere) . . . . .   | 916 |
| 33.3.5 | Annelida (Ringelwürmer) . . . . .   | 920 |
| 33.4   | Ecdysozoa sind die artenreichste Tiergruppe . . . . .   | 923 |
| 33.4.1 | Nematoda (Fadenwürmer) . . . . .  | 923 |
| 33.4.2 | Arthropoda (Gliederfüßer) . . . . .   | 924 |
| 33.5   | Echinodermata und Chordata sind Deuterostomia . . . . .   | 935 |
| 33.5.1 | Echinodermata (Stachelhäuter) . . . . .   | 936 |
| 33.5.2 | Chordata (Chordatiere) . . . . .  | 937 |

## Kapitel 34 Wirbeltiere

|        |  |     |
|--------|--|-----|
| 34.1   | Chordaten haben eine Chorda dorsalis und ein dorsales Neuralrohr . . . . .                             | 943 |
| 34.1.1 | Abgeleitete Chordatenmerkmale . . . . .  | 944 |
| 34.1.2 | Acrania Cephalochordata (Lanzettfischchen) . . . . .   | 945 |
| 34.1.3 | Tunicata (Manteltiere) . . . . .   | 946 |
| 34.1.4 | Die frühe Chordatenevolution . . . . .   | 947 |
| 34.2   | Craniota sind Chordaten, die einen Schädel haben . . . . .   | 948 |
| 34.2.1 | Abgeleitete Craniotenmerkmale . . . . .  | 949 |
| 34.2.2 | Die Entstehung der Cranioten . . . . .   | 949 |
| 34.2.3 | Myxinoida (Schleimaale) . . . . .  | 950 |
| 34.3   | Wirbeltiere sind Cranioten, die eine Wirbelsäule haben . . . . .                                       | 951 |
| 34.3.1 | Abgeleitete Wirbeltiermerkmale . . . . .   | 951 |
| 34.3.2 | Neunaugen . . . . .  | 951 |
| 34.3.3 | Fossilien früher Wirbeltiere . . . . .   | 952 |
| 34.3.4 | Der Ursprung von Knochen und Zähnen . . . . .  | 953 |
| 34.4   | Gnathostomata sind Wirbeltiere, die einen Kiefer haben . . . . .                                       | 953 |
| 34.4.1 | Abgeleitete Gnathostomenmerkmale . . . . .   | 953 |
| 34.4.2 | Fossile Gnatosthomata . . . . .  | 954 |
| 34.4.3 | Chondrichthyes (Knorpelfische: Haie, Rochen und Verwandte) . . . . .                                   | 955 |
| 34.4.4 | Actinopterygii und Sarcopterygii (Strahlenflosser und Fleischflosser) . . . . .                        | 957 |
| 34.5   | Tetrapoda sind Osteognathostomata, die Laufbeine haben . . . . .                                       | 960 |
| 34.5.1 | Abgeleitete Tetrapodenmerkmale . . . . .   | 960 |
| 34.5.2 | Die Entstehung der Tetrapoden . . . . .  | 961 |
| 34.5.3 | Lissamphibia (Amphibien) . . . . .   | 961 |
| 34.6   | Amniota sind Tetrapoda, bei denen ein für das Landleben angepasstes Eistadium entstanden ist . . . . . | 965 |
| 34.6.1 | Abgeleitete Amniotenmerkmale . . . . .   | 965 |
| 34.6.2 | Frühe Amnioten . . . . .   | 967 |
| 34.6.3 | Sauropsida . . . . .   | 967 |
| 34.7   | Mammalia sind Amnioten, die behaart sind und Milch produzieren . . . . .                               | 974 |
| 34.7.1 | Abgeleitete Säugetiermerkmale . . . . .  | 974 |

|        |  |     |
|--------|--|-----|
| 34.7.2 | Frühevolution der Säugetiere . . . . .   | 975 |
| 34.7.3 | Monotremata (Kloakentiere) . . . . .   | 975 |
| 34.7.4 | Marsupialia (Beuteltiere) . . . . .  | 976 |
| 34.7.5 | Eutheria (Placentatiere) . . . . .   | 977 |
| 34.8   | Menschen sind Säugetiere, die ein großes Gehirn haben und sich auf zwei Beinen fortbewegen . . . . . | 981 |
| 34.8.1 | Abgeleitete menschliche Merkmale . . . . .   | 981 |
| 34.8.2 | Die ersten Homininen . . . . .   | 983 |
| 34.8.3 | Die Australopithecinen . . . . .   | 985 |
| 34.8.4 | Zweibeinigkeit (Bipedie) . . . . .   | 986 |
| 34.8.5 | Werkzeuggebrauch . . . . .   | 986 |
| 34.8.6 | Frühe Vertreter der Gattung <i>Homo</i> . . . . .  | 987 |
| 34.8.7 | Die Neandertaler . . . . .   | 988 |
| 34.8.8 | <i>Homo sapiens</i> . . . . .  | 988 |

## TEIL VI Pflanzen – Form und Funktion 995

### Kapitel 35 Blütenpflanzen: Struktur, Wachstum, Entwicklung 998

|        |  |      |
|--------|--|------|
| 35.1   | Bau und Funktion des Pflanzenkörpers – die Anatomie von Organen, Geweben und Zellen . . . . .                | 999  |
| 35.1.1 | Die drei Grundorgane der Blütenpflanze: Wurzel, Spross und Blatt . . . . .                                   | 1000 |
| 35.1.2 | Abschlussgewebe, Leitgewebe und Grundgewebe . . . . .  | 1003 |
| 35.1.3 | Grundtypen der Pflanzenzelle . . . . .   | 1006 |
| 35.2   | Meristeme bilden Zellen für neue Organe . . . . .  | 1009 |
| 35.3   | Primäres Wachstum ist verantwortlich für die Längenzunahme von Wurzel und Sprossachse . . . . .              | 1011 |
| 35.3.1 | Primäres Wachstum der Wurzel . . . . .   | 1011 |
| 35.3.2 | Primäres Wachstum des Sprosses . . . . .   | 1012 |
| 35.4   | Sekundäres Dickenwachstum vergrößert bei verholzten Pflanzen den Umfang von Sprossachse und Wurzel . . . . . | 1015 |
| 35.4.1 | Cambium und sekundäres Leitgewebe . . . . .  | 1017 |
| 35.4.2 | Das Korkcambium und die Bildung des Periderms . . . . .  | 1019 |
| 35.5   | Wachstum, Morphogenese und Differenzierung formen den Pflanzenkörper . . . . .                               | 1020 |
| 35.5.1 | Die Molekularbiologie revolutioniert die Pflanzenwissenschaften . . . . .                                    | 1020 |
| 35.5.2 | Wachstum – Zellteilung und Zellstreckung . . . . .   | 1020 |
| 35.5.3 | Morphogenese und Musterbildung . . . . .   | 1023 |
| 35.5.4 | Genexpression und Kontrolle der Zelldifferenzierung . . . . .  | 1024 |
| 35.5.5 | Einfluss der Zellposition auf die weitere Entwicklung . . . . .  | 1025 |
| 35.5.6 | Veränderte Entwicklungsprozesse durch Phasenwechsel . . . . .  | 1026 |
| 35.5.7 | Genetische Kontrolle der Blütenentwicklung . . . . .   | 1027 |

### Kapitel 36 Stoffaufnahme und Stofftransport bei Gefäßpflanzen 1032

|        |   |      |
|--------|---|------|
| 36.1   | Landpflanzen nehmen Stoffe sowohl oberirdisch als auch unterirdisch auf . . . . .                               | 1033 |
| 36.1.1 | Aufbau der Sprossachse und Lichtabsorption . . . . .  | 1034 |
| 36.1.2 | Wurzelaufbau und die Aufnahme von Wasser und Mineralstoffen . . . . .   | 1036 |
| 36.2   | Transport durch Kurzstrecken-Diffusion oder aktiven Transport sowie durch Langstrecken-Massenströmung . . . . . | 1037 |
| 36.2.1 | Diffusion und aktiver Transport von gelösten Stoffen . . . . .  | 1037 |
| 36.2.2 | Diffusion von Wasser (Osmose) . . . . .   | 1038 |
| 36.2.3 | Drei Haupttransportwege . . . . .   | 1041 |
| 36.2.4 | Massenströmung beim Langstreckentransport . . . . .   | 1042 |

|   |  |      |
|---|--|------|
| 36.3  | Wasser und Mineralstoffe werden von der Wurzel zum Spross transportiert . . . . .                            | 1043 |
| 36.3.1  | Aufnahme von Wasser und Mineralstoffen in die Wurzelzellen . . . . .   | 1043 |
| 36.3.2  | Transport von Wasser und Mineralstoffen ins Xylem . . . . .  | 1043 |
| 36.3.3  | Massenströmung wird durch negativen Druck im Xylem angetrieben . . . . .                                     | 1045 |
| 36.3.4  | Das Steigen des Xylemsafts durch Massenströmung:<br>Zusammenfassung . . . . .                                | 1048 |
| 36.4  | Stomata sind an der Regulierung der Transpirationsrate beteiligt . . . . .                                   | 1049 |
| 36.4.1  | Stomata als wichtigster Ort des Wasserverlusts . . . . .   | 1049 |
| 36.4.2  | Mechanismen der Spaltöffnungsbewegung . . . . .  | 1049 |
| 36.4.3  | Reize für die Spaltöffnungsbewegung . . . . .  | 1050 |
| 36.4.4  | Auswirkungen der Transpiration auf Welken und Blatttemperatur . . . . .                                      | 1051 |
| 36.4.5  | Anpassungen, die den Wasserverlust durch Verdunstung vermindern . . . . .                                    | 1051 |
| 36.5  | Zuckertransport erfolgt vom Produktionsort – den Blättern –<br>zum Verbrauchs- oder Speicherort . . . . .    | 1051 |
| 36.5.1  | Zuckertransport von <i>Source</i> zu <i>Sink</i> . . . . .   | 1052 |
| 36.5.2  | Massenströmung durch positiven Druck – Assimilatetransport<br>bei Angiospermen . . . . .                     | 1054 |
| 36.6  | Der Symplast – ein dynamisches System . . . . .  | 1054 |
| 36.6.1  | Plasmodesmen – ständig wechselnde Strukturen . . . . .   | 1055 |
| 36.6.2  | Elektrisches „ <i>Signaling</i> “ im Phloem . . . . .  | 1056 |
| 36.6.3  | Das Phloem – eine „ <i>Datenautobahn</i> “ . . . . .   | 1057 |
| <b>Kapitel 37 Boden und Pflanzenernährung</b>                       |  | 1060 |
| 37.1  | Boden – eine lebende, jedoch endliche Ressource . . . . .  | 1061 |
| 37.1.1  | Bodenart . . . . .   | 1061 |
| 37.1.2  | Zusammensetzung des Oberbodens . . . . .   | 1062 |
| 37.1.3  | Bodenschutz und nachhaltige Landwirtschaft . . . . .   | 1063 |
| 37.2  | Pflanzen benötigen für ihren Lebenszyklus essenzielle Nährelemente . . . . .                                 | 1066 |
| 37.2.1  | Makro- und Mikronährälemente . . . . .   | 1067 |
| 37.2.2  | Symptome des Nährstoffmangels . . . . .  | 1068 |
| 37.2.3  | Verbesserung der Pflanzenernährung durch Gentechnik –<br>einige Beispiele . . . . .                          | 1070 |
| 37.3  | Zur Pflanzenernährung tragen auch andere Organismen bei . . . . .  | 1071 |
| 37.3.1  | Bodenbakterien und Pflanzenernährung . . . . .   | 1071 |
| 37.3.2  | Pilze und Pflanzenernährung . . . . .  | 1075 |
| 37.3.3  | Epiphyten, parasitische Pflanzen und carnivore Pflanzen . . . . .  | 1077 |
| <b>Kapitel 38 Fortpflanzung und Biotechnologie bei Angiospermen</b> |  | 1082 |
| 38.1  | Blüten, doppelte Befruchtung und Früchte: Besonderheiten<br>im Entwicklungszyklus der Angiospermen . . . . . | 1084 |
| 38.1.1  | Aufbau und Funktion der Blüte . . . . .  | 1084 |
| 38.1.2  | Doppelte Befruchtung . . . . .   | 1087 |
| 38.1.3  | Entwicklung, Gestalt und Funktion des Samens . . . . .   | 1089 |
| 38.1.4  | Gestalt und Funktion der Frucht . . . . .  | 1093 |
| 38.2  | Sexuelle und asexuelle Fortpflanzung bei Angiospermen . . . . .  | 1096 |
| 38.2.1  | Mechanismen der asexuellen (vegetativen) Fortpflanzung . . . . .   | 1096 |
| 38.2.2  | Vor- und Nachteile von sexueller und asexueller Fortpflanzung . . . . .                                      | 1096 |
| 38.2.3  | Mechanismen zur Verhinderung der Selbstbestäubung . . . . .  | 1097 |
| 38.2.4  | Vegetative Vermehrung und Landwirtschaft . . . . .   | 1098 |
| 38.3  | Der Mensch verändert die Nutzpflanzen durch Züchtung und Gentechnik . . . . .                                | 1100 |
| 38.3.1  | Pflanzenzüchtung . . . . .   | 1100 |
| 38.3.2  | Biotechnologie und Gentechnik bei Pflanzen . . . . .   | 1101 |
| 38.3.3  | Kontroverse Pflanzenbiotechnologie . . . . .   | 1103 |

|        |  |      |
|--------|--|------|
| 39.1   | Signaltransduktionswege – die Verbindung zwischen Perzeption und Antwort ..... | 1110 |
| 39.1.1 | Perzeption (Erkennung) .....   | 1112 |
| 39.1.2 | Transduktion (Übertragung) .....   | 1112 |
| 39.1.3 | Antwort .....  | 1112 |
| 39.2   | Pflanzenhormone koordinieren Wachstum, Entwicklung und Reizantworten .....     | 1114 |
| 39.2.1 | Entdeckung der Pflanzenhormone .....   | 1115 |
| 39.2.2 | Übersicht über die Phytohormone .....  | 1117 |
| 39.2.3 | Systembiologie und Hormonwechselwirkungen .....                                | 1127 |
| 39.3   | Pflanzen brauchen Licht .....  | 1128 |
| 39.3.1 | Blaulicht-Photorezeptoren .....  | 1129 |
| 39.3.2 | Phytochrome als Photorezeptoren .....  | 1129 |
| 39.3.3 | Biologische Uhren und circadiane Rhythmik .....                                | 1131 |
| 39.3.4 | Die Wirkung des Lichts auf die biologische Uhr .....                           | 1133 |
| 39.3.5 | Photoperiodismus und Anpassungen an Jahreszeiten .....                         | 1133 |
| 39.4   | Pflanzen reagieren, abgesehen von Licht, auf viele weitere Reize .....         | 1136 |
| 39.4.1 | Schwerkraft .....  | 1136 |
| 39.4.2 | Mechanische Reize .....  | 1137 |
| 39.4.3 | Umweltstress .....   | 1139 |
| 39.5   | Reaktionen der Pflanze auf Herbivoren und Pathogene .....                      | 1141 |
| 39.5.1 | Verteidigungsstrategien gegen Herbivoren .....                                 | 1142 |
| 39.5.2 | Verteidigungsstrategien gegen Pathogene .....                                  | 1142 |

**TEIL VII Tiere – Form und Funktion****Kapitel 40 Grundprinzipien tierischer Form und Funktion**

|        |  |      |
|--------|--|------|
| 40.1   | Form und Funktion sind bei Tieren auf allen Organisationsebenen eng miteinander korreliert ..... | 1153 |
| 40.1.1 | Physikalische Gesetze beeinflussen die Größe und Gestalt von Tieren .....                        | 1154 |
| 40.1.2 | Austausch mit der Umgebung .....   | 1154 |
| 40.1.3 | Hierarchische Organisation der Körperbaupläne .....  | 1156 |
| 40.1.4 | Struktur und Funktion von Geweben .....  | 1158 |
| 40.1.5 | Koordination und Kontrolle .....   | 1162 |
| 40.2   | Regulation des inneren Milieus .....   | 1163 |
| 40.2.1 | Regulierer und Konformer .....   | 1163 |
| 40.2.2 | Homöostase .....   | 1164 |
| 40.3   | Einfluss von Form, Funktion und Verhalten auf homöostatische Prozesse .....                      | 1166 |
| 40.3.1 | Endothermie und Ektothermie .....  | 1166 |
| 40.3.2 | Veränderung der Körpertemperatur .....   | 1167 |
| 40.3.3 | Gleichgewicht zwischen Wärmeabgabe und Wärmeaufnahme .....                                       | 1167 |
| 40.3.4 | Anpassung an unterschiedliche Temperaturbereiche .....   | 1172 |
| 40.3.5 | Physiologischer Thermostat und Fieber .....  | 1172 |
| 40.4   | Energiebedarf eines Tieres in Abhängigkeit von Größe, Aktivität und Umwelt .....                 | 1174 |
| 40.4.1 | Bereitstellung und Nutzung von Energie .....   | 1174 |
| 40.4.2 | Quantifizierung des Energieverbrauchs .....  | 1174 |
| 40.4.3 | Minimale Stoffwechselrate und Thermoregulation .....   | 1175 |
| 40.4.4 | Faktoren, die die Stoffwechselrate beeinflussen .....  | 1176 |
| 40.4.5 | Energiehaushalt .....  | 1176 |
| 40.4.6 | Torpor und Energiesparen .....   | 1178 |

## Kapitel 41 Hormone und das endokrine System

|        |  |      |
|--------|--|------|
| 41.1   | Signalmoleküle, ihre Bindung an die Rezeptoren und die von ihnen ausgelösten spezifischen Reaktionswege .....    | 1184 |
| 41.1.1 | Typen sezernierter Signalmoleküle .....  | 1184 |
| 41.1.2 | Chemische Klassen von Hormonen .....   | 1185 |
| 41.1.3 | Die Lage der Hormonrezeptoren: Wissenschaftliche Forschung .....   | 1186 |
| 41.1.4 | Reaktionswege in den Zellen .....  | 1186 |
| 41.1.5 | Mehrfachwirkungen von Hormonen .....   | 1189 |
| 41.1.6 | Signalübertragung durch lokale Regulatoren .....   | 1190 |
| 41.2   | Negative Rückkopplung und antagonistische Hormonpaare:<br>Zwei verbreitete Merkmale des endokrinen Systems ..... | 1191 |
| 41.2.1 | Einfache Hormonmechanismen .....   | 1191 |
| 41.2.2 | Die Steuerung des Blutglucosespiegels durch Insulin und Glucagon .....   | 1191 |
| 41.3   | Physiologische Regulation bei Tieren durch getrennte und gemeinsame Wirkungen von Hormon- und Nervensystem ..... | 1194 |
| 41.3.1 | Koordination von Hormon- und Nervensystem bei Wirbellosen .....  | 1194 |
| 41.3.2 | Koordination von Hormon- und Nervensystem bei Wirbeltieren .....   | 1194 |
| 41.3.3 | Hormone des Hypophysenhinterlappens .....  | 1196 |
| 41.3.4 | Hormone des Hypophysenvorderlappens .....  | 1199 |
| 41.4   | Hormonelle Regulation von Stoffwechsel, Homöostase, Entwicklung und Verhalten .....                              | 1201 |
| 41.4.1 | Schilddrüsenhormone: Steuerung von Stoffwechsel und Entwicklung .....  | 1201 |
| 41.4.2 | Parathormon und Vitamin D: Steuerung des $\text{Ca}^{2+}$ -Spiegels im Blut .....                                | 1202 |
| 41.4.3 | Hormone der Nebennieren: Stressantwort .....   | 1203 |
| 41.4.4 | Geschlechtshormone aus den Geschlechtsdrüsen .....   | 1205 |
| 41.4.5 | Melatonin und Biorhythmus .....  | 1206 |

## Kapitel 42 Die Ernährung der Tiere

|        |  |      |
|--------|--|------|
| 42.1   | Die Nahrung der Tiere muss die Versorgung mit chemischer Energie, organischen Molekülen und essenziellen Nährstoffen gewährleisten ..... | 1211 |
| 42.1.1 | Essenzielle Nährstoffe .....   | 1212 |
| 42.1.2 | Mangelernährung .....  | 1213 |
| 42.1.3 | Ermittlung des Nährstoffbedarfs .....  | 1218 |
| 42.2   | Die wichtigsten Stadien der Nährstoffverarbeitung: Nahrungsaufnahme, Verdauung, Resorption und Ausscheidung .....                        | 1219 |
| 42.2.1 | Verdauungskompartimente .....  | 1220 |
| 42.3   | Spezialisierte Organe für die verschiedenen Stadien der Nahrungsverarbeitung im Verdauungssystem der Säugetiere .....                    | 1222 |
| 42.3.1 | Mundhöhle, Schlund und Speiseröhre .....   | 1224 |
| 42.3.2 | Verdauung im Magen .....   | 1225 |
| 42.3.3 | Verdauung im Dünndarm .....  | 1225 |
| 42.3.4 | Resorption im Dünndarm .....   | 1228 |
| 42.3.5 | Resorption im Dickdarm .....   | 1228 |
| 42.4   | Ernährung und die evolutive Anpassung der Verdauungssysteme von Wirbeltieren .....   | 1231 |
| 42.4.1 | Anpassung der Zähne .....  | 1233 |
| 42.4.2 | Anpassungen von Magen und Darm .....   | 1233 |
| 42.4.3 | Anpassungen durch Symbiose .....   | 1233 |
| 42.5   | Homöostasemechanismen und Energiehaushalt .....  | 1235 |
| 42.5.1 | Energiequellen und Energiespeicher .....   | 1235 |

|  |   |             |
|--|---|-------------|
| 42.5.2                                       | Überernährung und Übergewicht . . . . .   | 1236        |
| 42.5.3                                       | Fettsucht und Evolution . . . . .   | 1237        |
| <b>Kapitel 43 Kreislauf und Gasaustausch</b> |   | <b>1242</b> |
| 43.1   | Kreislaufsysteme verknüpfen alle Zellen des Körpers mit Austauschflächen . . . . .                          | 1243        |
| 43.1.1                                       | Gastrovaskularsysteme . . . . .   | 1244        |
| 43.1.2                                       | Offene und geschlossene Kreislaufsysteme . . . . .  | 1244        |
| 43.1.3                                       | Die Organisation von Kreislaufsystemen bei Wirbeltieren . . . . .   | 1246        |
| 43.2   | Koordinierte Kontraktionszyklen des Herzens treiben den doppelten Kreislauf bei Säugern an . . . . .        | 1249        |
| 43.2.1                                       | Der Säugerkreislauf . . . . .   | 1249        |
| 43.2.2                                       | Das Sägerherz: Eine nähere Betrachtung . . . . .  | 1249        |
| 43.2.3                                       | Der rhythmische Herzschlag . . . . .  | 1251        |
| 43.3   | Blutdruck und Blutfluss spiegeln Bau und Anordnung der Blutgefäße wider . . . . .                           | 1252        |
| 43.3.1                                       | Bau und Funktion von Blutgefäßen . . . . .  | 1252        |
| 43.3.2                                       | Strömungsgeschwindigkeit des Blutes . . . . .   | 1253        |
| 43.3.3                                       | Blutdruck . . . . .   | 1254        |
| 43.3.4                                       | Kapillarfunktion . . . . .  | 1257        |
| 43.3.5                                       | Flüssigkeitsrückführung durch das Lymphsystem . . . . .   | 1258        |
| 43.4   | Blutbestandteile und ihre Funktion bei Stoffaustausch,<br>Transport und Abwehr . . . . .                    | 1259        |
| 43.4.1                                       | Blutzusammensetzung und Funktion . . . . .  | 1259        |
| 43.4.2                                       | Erkrankungen des Herz-Kreislaufsystems . . . . .  | 1262        |
| 43.5   | Gasaustausch erfolgt an spezialisierten respiratorischen Oberflächen . . . . .                              | 1264        |
| 43.5.1                                       | Partialdruckgefälle beim Gasaustausch . . . . .   | 1264        |
| 43.5.2                                       | Atemmedien . . . . .  | 1264        |
| 43.5.3                                       | Respiratorische Oberflächen . . . . .   | 1265        |
| 43.5.4                                       | Kiemen bei wasserlebenden Tieren . . . . .  | 1265        |
| 43.5.5                                       | Tracheensysteme bei Insekten . . . . .  | 1266        |
| 43.5.6                                       | Lungen . . . . .  | 1267        |
| 43.6   | Atmung: Ventilation der Lunge . . . . .   | 1270        |
| 43.6.1                                       | Atmung bei Amphibien . . . . .  | 1270        |
| 43.6.2                                       | Atmung bei Säugern . . . . .  | 1270        |
| 43.6.3                                       | Atmung bei Vögeln . . . . .   | 1271        |
| 43.6.4                                       | Kontrolle der Atmung beim Menschen . . . . .  | 1272        |
| 43.7   | Anpassungen an den Gasaustausch: Respiratorische Proteine binden<br>und transportieren Atemgase . . . . .   | 1273        |
| 43.7.1                                       | Koordination von Zirkulation und Gasaustausch . . . . .   | 1273        |
| 43.7.2                                       | Respiratorische Proteine . . . . .  | 1274        |
| 43.7.3                                       | Tierische Spitzensportler . . . . .   | 1276        |
| <b>Kapitel 44 Das Immunsystem</b>            |   | <b>1282</b> |
| 44.1   | Das angeborene Immunsystem basiert auf der Erkennung gemeinsamer Muster<br>von Krankheitserregern . . . . . | 1284        |
| 44.1.1                                       | Angeborene Immunabwehr wirbelloser Tiere . . . . .  | 1284        |
| 44.1.2                                       | Angeborene Immunabwehr der Wirbeltiere . . . . .  | 1285        |
| 44.1.3                                       | Wie Krankheitserreger dem angeborenen Immunsystem entgehen . . . . .  | 1290        |
| 44.2   | Erworbene Immunität, Lymphocytenrezeptoren und spezifische Erkennung<br>von Krankheitserregern . . . . .    | 1290        |
| 44.2.1                                       | Erworbene Immunität: Ein Überblick . . . . .  | 1291        |
| 44.2.2                                       | Antigenerkennung durch Lymphocyten . . . . .  | 1291        |
| 44.2.3                                       | Die Entwicklung der Lymphocyten . . . . .   | 1294        |

|  |  |      |
|--|--|------|
| 44.3   | Erworbenes Immunsystem und die Abwehr von Infektionen in Körperzellen und Körperflüssigkeiten . . . . .        | 1298 |
| 44.3.1   | Helfer-T-Zellen: Reaktion auf nahezu alle Antigene . . . . .   | 1299 |
| 44.3.2   | Cytotoxische T-Zellen: Abwehr gegen intrazelluläre Erreger . . . . .   | 1299 |
| 44.3.3   | B-Zellen: Abwehr gegen extrazelluläre Krankheitserreger . . . . .  | 1300 |
| 44.3.4   | Aktive und passive Immunisierung . . . . .   | 1303 |
| 44.3.5   | Immunologische Abstoßung . . . . .   | 1304 |
| 44.4   | Störungen des Immunsystems . . . . .   | 1306 |
| 44.4.1   | Übermäßige, gegen körpereigene Strukturen gerichtete und verminderte Immunreaktionen . . . . .                 | 1306 |
| 44.4.2   | Strategien der Krankheitserreger zur Umgehung der erworbenen Immunabwehr . . . . .                             | 1308 |
| 44.4.3   | Krebs und Immunsystem . . . . .  | 1310 |
| <b>Kapitel 45 Osmoregulation und Exkretion</b> |  | 1314 |
| 45.1   | Osmoregulation: Gleichgewicht zwischen Aufnahme und Abgabe von Wasser und den darin gelösten Stoffen . . . . . | 1315 |
| 45.1.1   | Osmose und Osmolarität . . . . .   | 1316 |
| 45.1.2   | Osmotische Herausforderungen . . . . .   | 1316 |
| 45.1.3   | Die Energetik der Osmoregulation . . . . .   | 1319 |
| 45.1.4   | Transportepithelien . . . . .  | 1320 |
| 45.2   | Die stickstoffhaltigen Exkretionsprodukte eines Tieres spiegeln dessen Phylogenie und Habitat wider . . . . .  | 1321 |
| 45.2.1   | Formen stickstoffhaltiger Exkretionsprodukte . . . . .   | 1322 |
| 45.2.2   | Einfluss von Evolution und Umwelt auf stickstoffhaltige Exkretionsprodukte . . . . .                           | 1323 |
| 45.3   | Verschiedene Exkretionssysteme sind Abwandlungen tubulärer Systeme . . . . .                                   | 1324 |
| 45.3.1   | Exkretionsprozesse . . . . .   | 1324 |
| 45.3.2   | Ein Überblick über verschiedene Exkretionssysteme . . . . .  | 1324 |
| 45.3.3   | Bau der Säugerniere . . . . .  | 1326 |
| 45.4   | Das Nephron: Schrittweise Verarbeitung des Ultrafiltrats . . . . .   | 1328 |
| 45.4.1   | Vom Ultrafiltrat zum Urin: Eine genauere Betrachtung . . . . .   | 1329 |
| 45.4.2   | Osmotische Gradienten und Wasserkonservierung . . . . .  | 1331 |
| 45.4.3   | Anpassungen der Wirbeltierniere an unterschiedliche Lebensräume . . . . .                                      | 1333 |
| 45.5   | Hormonelle Regelkreise verknüpfen Nierenfunktion, Wasserhaushalt und Blutdruck . . . . .                       | 1335 |
| 45.5.1   | Antidiuretisches Hormon . . . . .  | 1335 |
| 45.5.2   | Das Renin-Angiotensin-Aldosteron-System . . . . .  | 1337 |
| 45.5.3   | Homöostatische Regulation der Niere . . . . .  | 1338 |
| <b>Kapitel 46 Fortpflanzung der Tiere</b>      |  | 1343 |
| 46.1   | Sexuelle und asexuelle Fortpflanzung im Tierreich . . . . .  | 1344 |
| 46.1.1   | Mechanismen ungeschlechtlicher Fortpflanzung . . . . .   | 1344 |
| 46.1.2   | Unisexuelle Fortpflanzung . . . . .  | 1345 |
| 46.1.3   | Bisexuelle Fortpflanzung: Ein evolutionäres Rätsel . . . . .   | 1345 |
| 46.1.4   | Fortpflanzungszyklen und -muster . . . . .   | 1346 |
| 46.2   | Die Befruchtung hängt von Mechanismen ab, die Eizellen und Spermien derselben Art zusammenbringen . . . . .    | 1348 |
| 46.2.1   | Das Überleben des Nachwuchses sichern . . . . .  | 1349 |
| 46.2.2   | Gametenproduktion und -übergabe . . . . .  | 1350 |
| 46.3   | Keimzellenproduktion und -transport mittels Fortpflanzungsorganen . . . . .                                    | 1353 |
| 46.3.1   | Das weibliche Fortpflanzungssystem . . . . .   | 1353 |

|        |  |      |
|--------|--|------|
| 46.3.2 | Das männliche Fortpflanzungssystem . . . . .   | 1355 |
| 46.3.3 | Die sexuelle Reaktion des Menschen . . . . .   | 1357 |
| 46.4   | Unterschiede in Zeitverlauf und Muster der Meiose<br>bei männlichen und weiblichen Säugern . . . . . | 1358 |
| 46.5   | Fortpflanzungsregulierung bei Säugern: Ein komplexes Zusammenspiel<br>von Hormonen . . . . .         | 1358 |
|        | 46.5.1 Hormonelle Kontrolle des männlichen Fortpflanzungssystems . . . . .                           | 1359 |
|        | 46.5.2 Der weibliche Fortpflanzungszyklus . . . . .  | 1359 |
| 46.6   | Bei placentalen Säugern findet die gesamte Embryonalentwicklung<br>im Uterus statt . . . . .         | 1365 |
|        | 46.6.1 Empfängnis, Embryonalentwicklung und Geburt . . . . .   | 1365 |
|        | 46.6.2 Maternale Immuntoleranz gegenüber Embryo und Fetus . . . . .                                  | 1368 |
|        | 46.6.3 Empfängnisverhütung und Abtreibung . . . . .  | 1369 |
|        | 46.6.4 Moderne Reproduktionstechniken . . . . .  | 1371 |

## Kapitel 47 Entwicklung der Tiere

|      |   |      |
|------|---|------|
| 47.1 | Nach der Befruchtung schreitet die Embryonalentwicklung durch Furchung,<br>Gastrulation und Organogenese fort . . . . .         | 1378 |
|      | 47.1.1 Besamung und Befruchtung . . . . .   | 1378 |
|      | 47.1.2 Furchung . . . . .   | 1382 |
|      | 47.1.3 Gastrulation . . . . .   | 1385 |
|      | 47.1.4 Organogenese . . . . .   | 1389 |
|      | 47.1.5 Entwicklungsphysiologische Anpassungen von Amnionen . . . . .  | 1391 |
|      | 47.1.6 Die Entwicklung von Säugern . . . . .  | 1392 |
| 47.2 | An der tierischen Morphogenese sind spezifische Veränderungen in Zellform,<br>Zellposition und Zelladhäsion beteiligt . . . . . | 1394 |
|      | 47.2.1 Cytoskelett, Zellbewegung und konvergente Ausdehnung . . . . .   | 1395 |
|      | 47.2.2 Rolle der Zelladhäsionsmoleküle und der extrazellulären Matrix . . . . .   | 1396 |
| 47.3 | Das Schicksal von sich entwickelnden Zellen ist von ihrer Vorgeschichte<br>und induktiven Signalen abhängig . . . . .           | 1397 |
|      | 47.3.1 Anlagepläne . . . . .  | 1399 |
|      | 47.3.2 Entstehung zellulärer Asymmetrien . . . . .  | 1400 |
|      | 47.3.3 Festlegung des Zellschicksals und Musterbildung durch<br>induktive Signale . . . . .                                     | 1402 |

## Kapitel 48 Neurone, Synapsen und Signalgebung

|      |  |      |
|------|--|------|
| 48.1 | Neuronale Organisation und Struktur als Spiegel der Funktion<br>bei der Informationsübermittlung . . . . . | 1411 |
|      | 48.1.1 Einführung in die Informationsverarbeitung . . . . .  | 1412 |
|      | 48.1.2 Neuronale Struktur und Funktion . . . . .   | 1412 |
| 48.2 | Aufrechterhaltung des Ruhepotenzials eines Neurons durch Ionenpumpen<br>und Ionenkanäle . . . . .          | 1413 |
|      | 48.2.1 Entstehung des Ruhepotenzials . . . . .   | 1414 |
|      | 48.2.2 Ein Modell des Ruhepotenzials . . . . .   | 1415 |
| 48.3 | Axonale Fortleitung von Aktionspotenzialen . . . . .   | 1417 |
|      | 48.3.1 Erzeugung von Aktionspotenzialen . . . . .  | 1417 |
|      | 48.3.2 Erzeugung von Aktionspotenzialen: Eine nähere Betrachtung . . . . .                                 | 1418 |
|      | 48.3.3 Fortleitung von Aktionspotenzialen . . . . .  | 1420 |
| 48.4 | Synapsen als Kontaktstellen zwischen Neuronen . . . . .  | 1422 |
|      | 48.4.1 Erzeugung postsynaptischer Potenziale . . . . .   | 1423 |
|      | 48.4.2 Summation postsynaptischer Potenziale . . . . .   | 1423 |
|      | 48.4.3 Modulation der synaptischen Übertragung . . . . .   | 1425 |
|      | 48.4.4 Neurotransmitter . . . . .  | 1425 |

## Kapitel 49 Nervensysteme

|        |   |      |
|--------|---|------|
| 49.1   | Nervensysteme bestehen aus Neuronenschaltkreisen und unterstützenden Zellen .....     | 1433 |
| 49.1.1 | Organisation des Wirbeltiernervensystems .....  | 1435 |
| 49.1.2 | Das periphere Nervensystem .....  | 1437 |
| 49.2   | Regionale Spezialisierung des Wirbeltiergehirns .....                                 | 1439 |
| 49.2.1 | Der Hirnstamm .....   | 1440 |
| 49.2.2 | Das Kleinhirn (Cerebellum) .....  | 1442 |
| 49.2.3 | Das Zwischenhirn (Diencephalon) .....   | 1442 |
| 49.2.4 | Das Großhirn (Cerebrum) .....   | 1443 |
| 49.2.5 | Die Evolution der Kognition bei Wirbeltieren .....                                    | 1444 |
| 49.3   | Die Großhirnrinde: Kontrolle von Willkürbewegungen und kognitiven Funktionen .....    | 1445 |
| 49.3.1 | Informationsverarbeitung in der Großhirnrinde .....                                   | 1446 |
| 49.3.2 | Sprache und Sprechen .....  | 1447 |
| 49.3.3 | Lateralisierung corticaler Funktionen .....   | 1448 |
| 49.3.4 | Emotionen .....   | 1448 |
| 49.3.5 | Bewusstsein .....   | 1449 |
| 49.4   | Gedächtnis und Lernen als Folge von Veränderungen der synaptischen Verbindungen ..... | 1450 |
| 49.4.1 | Neuronale Plastizität .....   | 1450 |
| 49.4.2 | Gedächtnis und Lernen .....   | 1450 |
| 49.4.3 | Langzeitpotenzierung .....  | 1451 |
| 49.5   | Störungen des Nervensystems: Erklärungen auf molekularer Basis .....                  | 1452 |
| 49.5.1 | Schizophrenie .....   | 1453 |
| 49.5.2 | Depressionen .....  | 1454 |
| 49.5.3 | Substanzmissbrauch und das Belohnungssystem des Gehirns .....                         | 1454 |
| 49.5.4 | Alzheimer-Krankheit .....   | 1455 |
| 49.5.5 | Parkinson-Krankheit .....   | 1455 |
| 49.5.6 | Stammzelltherapie .....   | 1456 |

## Kapitel 50 Sensorische und motorische Mechanismen

1461

|        |  |      |
|--------|--|------|
| 50.1   | Sensorische Rezeptoren: Umwandlung von Reizenergie und Signalübermittlung an das Zentralnervensystem ..... | 1462 |
| 50.1.1 | Sensorische Bahnen .....   | 1462 |
| 50.1.2 | Sensorische Rezeptortypen .....  | 1464 |
| 50.2   | Mechanorezeptoren nehmen Flüssigkeits- oder Partikelbewegungen wahr .....                                  | 1467 |
| 50.2.1 | Wahrnehmung von Schwerkraft und Schall bei Wirbellosen .....   | 1467 |
| 50.2.2 | Gehör und Gleichgewichtssinn bei Säugern .....   | 1468 |
| 50.2.3 | Gehör und Gleichgewichtssinn bei anderen Wirbeltieren .....  | 1472 |
| 50.3   | Geschmacks- und Geruchssinn basieren auf ähnlichen Sinneszellsätzen .....                                  | 1473 |
| 50.3.1 | Der Geschmackssinn bei Säugern .....   | 1474 |
| 50.3.2 | Der Geruchssinn des Menschen .....   | 1475 |
| 50.4   | Im ganzen Tierreich basiert das Sehen auf ähnlichen Mechanismen .....                                      | 1477 |
| 50.4.1 | Sehen bei Wirbellosen .....  | 1477 |
| 50.4.2 | Das Sehsystem von Wirbeltieren .....   | 1478 |
| 50.5   | Muskelkontraktion erfordert die Interaktion von Muskelproteinen .....                                      | 1484 |
| 50.5.1 | Die Skelettmuskulatur von Wirbeltieren .....   | 1484 |
| 50.5.2 | Andere Muskeltypen .....   | 1490 |
| 50.6   | Das Skelettsystem wandelt Muskelkontraktion in Fortbewegung um .....                                       | 1491 |
| 50.6.1 | Skelettsystemtypen .....   | 1492 |
| 50.6.2 | Verschiedene Formen der Fortbewegung .....   | 1495 |
| 50.6.3 | Energetische Kosten der Fortbewegung .....   | 1496 |

|        |  |      |
|--------|--|------|
| 51.1   | Bestimmte sensorische Eingangssignale können sowohl einfaches als auch komplexes Verhalten auslösen .....            | 1503 |
| 51.1.1 | Festgelegte Reaktionsmuster .....  | 1504 |
| 51.1.2 | Gerichtete Bewegung .....  | 1505 |
| 51.1.3 | Verhaltensbiologische Rhythmen .....   | 1506 |
| 51.1.4 | Signalgebung und Kommunikation bei Tieren .....  | 1507 |
| 51.2   | Lernen: Spezifische Verknüpfung von Erfahrung und Verhalten .....  | 1510 |
| 51.2.1 | Habituation .....  | 1510 |
| 51.2.2 | Prägung .....  | 1510 |
| 51.2.3 | Räumliches Lernen .....  | 1511 |
| 51.2.4 | Assoziatives Lernen .....  | 1512 |
| 51.2.5 | Kognition und Problemlösung .....  | 1513 |
| 51.2.6 | Entwicklung von erlernten Verhaltensweisen .....   | 1514 |
| 51.3   | Genetische Ausstattung und Umwelt tragen zur Verhaltensentwicklung bei .....   | 1514 |
| 51.3.1 | Erfahrung und Verhalten .....  | 1515 |
| 51.3.2 | Regulatorogene und Verhalten .....   | 1515 |
| 51.3.3 | Genetisch determinierte Verhaltensvariabilität in natürlichen Populationen .....                                     | 1516 |
| 51.3.4 | Single-Locus-Effekte .....   | 1518 |
| 51.4   | Verhaltensweisen lassen sich durch Selektion auf Überleben und Fortpflanzungserfolg eines Individuums erklären ..... | 1519 |
| 51.4.1 | Verhalten beim Nahrungserwerb .....  | 1519 |
| 51.4.2 | Paarungsverhalten und Partnerwahl .....  | 1521 |
| 51.5   | Gesamtfitness kann die Evolution von altruistischem Sozialverhalten erklären .....                                   | 1526 |
| 51.5.1 | Altruismus .....   | 1526 |
| 51.5.2 | Gesamtfitness .....  | 1527 |
| 51.5.3 | Soziales Lernen .....  | 1529 |
| 51.5.4 | Evolution und menschliche Kultur .....   | 1531 |

**TEIL VIII Ökologie****Kapitel 52 Ökologie und die Biosphäre: Eine Einführung**

|        |  |      |
|--------|--|------|
| 52.1   | Die Ökologie integriert viele biologische Forschungsrichtungen und dient als wissenschaftliche Grundlage für den Natur- und Umweltschutz ..... | 1539 |
| 52.1.1 | Der Zusammenhang zwischen Ökologie und Evolutionsbiologie .....  | 1541 |
| 52.1.2 | Ökologie und Umweltschutz .....  | 1542 |
| 52.2   | Die Wechselbeziehungen zwischen Organismen und ihrer Umwelt bestimmen ihre Verbreitung und Häufigkeit .....                                    | 1543 |
| 52.2.1 | Ausbreitung und Verbreitung .....  | 1543 |
| 52.2.2 | Verhalten und Habitatselektion .....   | 1545 |
| 52.2.3 | Biotische Faktoren .....   | 1546 |
| 52.2.4 | Abiotische Faktoren .....  | 1547 |
| 52.2.5 | Klima .....  | 1548 |
| 52.3   | Aquatische Biome: Vielfältige und dynamische Systeme, die den größten Teil der Erdoberfläche einnehmen .....                                   | 1554 |
| 52.3.1 | Struktur aquatischer Biome .....   | 1555 |
| 52.4   | Klima und unvorhersagbare Umweltveränderungen bestimmen die Struktur und Verbreitung der terrestrischen Biome .....                            | 1564 |
| 52.4.1 | Makroklima und terrestrische Biome .....   | 1564 |

|  |             |
|--|-------------|
| 52.4.2 Allgemeine Eigenschaften terrestrischer Biome und die Bedeutung von Störungen .....                                     | 1565        |
| <b>Kapitel 53 Populationsökologie</b>  | <b>1575</b> |
| 53.1 Dynamische Prozesse und ihr Einfluss auf die Individuendichte, Individuenverteilung und Demografie von Populationen ..... | 1577        |
| 53.1.1 Individuendichte und Verteilungsmuster .....  | 1577        |
| 53.1.2 Demografie .....  | 1581        |
| 53.2 Wichtige Phasen im Lebenszyklus einer Organismenart als Produkt der natürlichen Selektion .....                           | 1584        |
| 53.2.1 Evolution und die Vielfalt von Lebenszyklen .....   | 1584        |
| 53.2.2 „Kompromisse“ und Lebenszyklus .....  | 1585        |
| 53.3 Exponentielles Wachstum: Ein Modell für Populationen in einer idealen, unbegrenzten Umwelt .....                          | 1587        |
| 53.3.1 Pro-Kopf-Zunahme .....  | 1587        |
| 53.3.2 Exponentielles Wachstum .....   | 1588        |
| 53.4 Das logistische Wachstumsmodell: Langsameres Populationswachstum bei Annäherung an die Umweltkapazität .....              | 1589        |
| 53.4.1 Das logistische Wachstumsmodell .....   | 1590        |
| 53.4.2 Das logistische Modell und natürliche Populationen .....  | 1591        |
| 53.4.3 Logistisches Modell und Lebenszyklus .....  | 1592        |
| 53.5 Dichteabhängige Einflüsse auf das Populationswachstum .....   | 1593        |
| 53.5.1 Populationsveränderungen und Individuendichte .....   | 1593        |
| 53.5.2 Dichteabhängige Regulation von Populationen .....   | 1594        |
| 53.5.3 Populationsdynamik .....  | 1596        |
| 53.6 Die menschliche Bevölkerung: Kein exponentielles Wachstum mehr, aber immer noch ein steiler Anstieg .....                 | 1599        |
| 53.6.1 Die Erdbevölkerung .....  | 1600        |
| 53.6.2 Globale Umweltkapazität .....   | 1603        |
| <b>Kapitel 54 Ökologie der Lebensgemeinschaften</b>  | <b>1609</b> |
| 54.1 Wechselbeziehungen zwischen Organismen: Positiv, negativ oder neutral .....   | 1611        |
| 54.1.1 Interspezifische Konkurrenz .....   | 1611        |
| 54.1.2 Prädation .....   | 1613        |
| 54.1.3 Parasitismus .....  | 1616        |
| 54.1.4 Herbivorie .....  | 1617        |
| 54.1.5 Mutualismus .....   | 1617        |
| 54.1.6 Parabiose und Kommensalismus .....  | 1618        |
| 54.1.7 Metabiose .....   | 1619        |
| 54.2 Der Einfluss von dominanten Arten und Schlüsselarten auf die Struktur von Lebensgemeinschaften .....                      | 1620        |
| 54.2.1 Artendiversität .....   | 1621        |
| 54.2.2 Trophische Strukturen .....   | 1621        |
| 54.2.3 Arten mit einer großen Bedeutung für die Lebensgemeinschaft .....   | 1622        |
| 54.2.4 Bottom-up- und top-down-Kontrolle in Nahrungsnetzen .....   | 1622        |
| 54.3 Der Einfluss von Störungen auf Artendiversität und Artenzusammensetzung .....   | 1623        |
| 54.3.1 Charakterisierung von Störungen .....   | 1630        |
| 54.3.2 Sukzession .....  | 1633        |
| 54.3.3 Von Menschen verursachte Störungen .....  | 1633        |
| 54.4 Biogeografische Faktoren und ihre Bedeutung für die Artendiversität in Lebensgemeinschaften .....                         | 1633        |
| 54.4.1 Breitengradabhängigkeit .....   | 1633        |

|  |   |             |
|--|---|-------------|
| 54.4.2   | Effekte der Flächengröße .....  | 1636        |
| 54.4.3   | Insel-Biogeografie .....  | 1637        |
| 54.5   | Lebensgemeinschaften: Ihre Bedeutung für das Verständnis der Lebenszyklen von Pathogenen und deren Bekämpfung ..... | 1638        |
| 54.5.1   | Pathogene und die Struktur von Lebensgemeinschaften .....   | 1639        |
| 54.5.2   | Lebensgemeinschaften und Zoonosen .....   | 1640        |
| <b>Kapitel 55 Ökosysteme</b>                             |   | <b>1645</b> |
| 55.1   | Der Energiehaushalt und die biogeochemischen Kreisläufe von Ökosystemen .....                                       | 1647        |
| 55.1.1   | Energieerhaltung .....  | 1647        |
| 55.1.2   | Erhaltung der Masse .....   | 1648        |
| 55.1.3   | Energie, Masse und Trophieebenen .....  | 1649        |
| 55.2   | Energie und andere limitierende Faktoren der Primärproduktion der Ökosysteme .....                                  | 1650        |
| 55.2.1   | Energiebilanzen von Ökosystemen .....   | 1650        |
| 55.2.2   | Primärproduktion in aquatischen Ökosystemen .....   | 1653        |
| 55.2.3   | Primärproduktion in terrestrischen Ökosystemen .....  | 1655        |
| 55.3   | Energietransfer zwischen Trophieebenen: Effizienz meist unter zehn Prozent .....                                    | 1656        |
| 55.3.1   | Produktionseffizienz .....  | 1656        |
| 55.3.2   | Die Grüne-Welt-Hypothese .....  | 1658        |
| 55.4   | Biologische und geochemische Prozesse regulieren die Nährstoffkreisläufe eines Ökosystems .....                     | 1659        |
| 55.4.1   | Biogeochemische Kreisläufe .....  | 1659        |
| 55.4.2   | Mineralisierungs- und Umsatzraten bei Nährstoffkreisläufen .....  | 1660        |
| 55.4.3   | Fallstudie: Nährstoffkreisläufe im Hubbard Brook Experimental Forest .....  | 1661        |
| 55.5   | Der Einfluss des Menschen auf die biogeochemischen Kreisläufe der Erde .....  | 1665        |
| 55.5.1   | Nährstoffanreicherung .....   | 1665        |
| 55.5.2   | Saurer Regen .....  | 1667        |
| 55.5.3   | Umweltgifte .....   | 1668        |
| 55.5.4   | Treibhausgase und globale Erwärmung .....   | 1669        |
| 55.5.5   | Abbau der stratosphärischen Ozonschicht .....   | 1673        |
| <b>Kapitel 56 Naturschutz und Renaturierungsökologie</b> |   | <b>1678</b> |
| 56.1   | Der Mensch als Gefahr für die biologische Vielfalt .....  | 1680        |
| 56.1.1   | Die drei Ebenen der biologischen Vielfalt .....   | 1680        |
| 56.1.2   | Biologische Vielfalt und das Wohlergehen des Menschen .....   | 1682        |
| 56.1.3   | Drei Gefahren für die biologische Vielfalt .....  | 1684        |
| 56.2   | Populationsgröße, genetische Variabilität und kritische Habitatgröße beim Schutz von Populationen .....             | 1687        |
| 56.2.1   | Methode der Ermittlung der minimalen überlebensfähigen Populationsgröße .....                                       | 1687        |
| 56.2.2   | Populationsexstinktion durch zufällige und häufige Umweltereignisse .....   | 1691        |
| 56.2.3   | Abwägen konkurrierender Ansprüche .....   | 1693        |
| 56.3   | Landschafts- und Gebietsschutz zur Erhaltung ganzer Biota .....   | 1694        |
| 56.3.1   | Struktur und biologische Vielfalt von Landschaften .....  | 1694        |
| 56.3.2   | Einrichtung von Schutzgebieten .....  | 1696        |
| 56.4   | Renaturierung: Wiederherstellung geschädigter Ökosysteme .....  | 1700        |
| 56.4.1   | Biologische Sanierung .....   | 1701        |
| 56.4.2   | Biologische Bestandsstützung .....  | 1701        |
| 56.4.3   | Renaturierung als Zukunftsaufgabe .....   | 1702        |

|        |   |      |
|--------|---|------|
| 56.5   | Nachhaltige Entwicklung: Die Bewahrung der biologischen Vielfalt<br>und ihr Nutzen für den Menschen ..... | 1702 |
| 56.5.1 | Das Konzept der nachhaltigen Entwicklung .....  | 1702 |
| 56.5.2 | Fallstudie: Nachhaltige Entwicklung in Costa Rica .....   | 1703 |
| 56.5.3 | Die Zukunft der Biosphäre .....   | 1706 |

## Anhang

|   |                                |      |
|---|--------------------------------|------|
| A | Lösungen .....                 | 1712 |
| B | Glossar .....                  | 1784 |
| C | Weiterführende Literatur ..... | 1853 |
| D | Bildnachweis .....             | 1855 |
| E | Index .....                    | 1863 |